



Universidad  
Nacional  
de Córdoba

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

---

## **PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA**

*“Caracterización hidráulica del flujo de  
aproximación al vertedero de la presa Los Alazanes  
(Prov. de Córdoba)”*

CARRERA: Ingeniería Civil

ALUMNO: JOAQUIN, Candelaria

TUTOR INTERNO: DR. ING. TARRAB, Leticia

TUTOR EXTERNO: MG. ING. EDER, Matías

AÑO 2018

---

# INDICE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION .....	8
1.1.	<b>DIQUE LOS ALAZANES</b> .....	8
1.2.	<b>MOTIVACION</b> .....	10
1.3.	<b>OBJETIVOS</b> .....	10
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	10
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	10
1.3.3.	OBJETIVOS PERSONALES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	11
1.4.	<b>METODOLOGIA</b> .....	11
2.	MARCO TEORICO.....	12
2.1.	<b>OBRAS DE DESCARGA</b> .....	12
2.1.1.	PARTES QUE CONSTITUYEN UNA OBRA DE DESCARGA .....	12
2.1.2.	DESCRIPCION DE ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LA PRÁCTICA SUPERVISADA... 13	
2.2.	<b>MODELACION FISICA</b> .....	21
2.2.1.	ANALISIS DIMENSIONAL – TEOREMA $\pi$ O DE VASCHY BUCKINGHAM .....	22
2.2.2.	PARAMETROS ADIMENSIONALES.....	23
2.2.3.	SIMILITUD Y MODELOS.....	24
2.2.4.	MODELOS DE ESCURRIMIENTO A SUPERFICIE LIBRE .....	26
3.	ESTUDIOS HIDROLÓGICOS .....	28
3.1.	<b>CUENCA HIDROGRÁFICA</b> .....	28
3.2.	<b>PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DE LA CUENCA</b> .....	29
3.3.	<b>PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA</b> .....	30
3.4.	<b>PRECIPITACIONES</b> .....	33
3.5.	<b>RESULTADOS</b> .....	38
4.	MATERIALES Y METODOS.....	43
4.1.	<b>INSTRUMENTAL DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNC</b> .....	43
4.2.	<b>MODELO FISICO 3D – LOS ALAZANES</b> .....	46
4.3.	<b>INSTRUMENTAL Y TECNICAS DE MEDICION UTILIZADOS</b> .....	50
4.3.1.	PIV (Velocimetría por imágenes de partículas) .....	50
4.3.2.	ADV (Velocímetro Acústico Doppler) .....	52
4.3.3.	FLOWTRACKER .....	56
4.3.4.	LIRAS PIEZOMETRICAS.....	57
4.3.5.	SENSORES DE PRESION.....	57

<b>4.4.</b>	<b>ENSAYOS</b> .....	58
4.4.1.	VELOCIDADES .....	60
<b>4.5.</b>	<b>MEDICIONES REALIZADAS</b> .....	65
5.	RESULTADOS .....	68
<b>5.1.</b>	<b>CURVA ALTURA-CAUDAL</b> .....	68
5.1.1.	COMPARACION CON CURVA TEORICA.....	69
<b>5.2.</b>	<b>MEDICION DE VELOCIDADES</b> .....	71
5.2.1.	AGUAS ARRIBA .....	71
5.2.2.	SOBRE EL VERTEDERO .....	78
<b>5.3.</b>	<b>PRESIONES</b> .....	84
5.3.1.	PIEZOMETRICAS.....	84
5.3.2.	SENSORES DE PRESION.....	86
<b>5.4.</b>	<b>ANALISIS DIMENSIONAL Y EFECTOS DE ESCALA</b> .....	88
6.	CONCLUSIONES .....	92
<b>6.1.</b>	<b>CONCLUSIONES PERSONALES</b> .....	92
7.	BIBLIOGRAFIA .....	93

## INDICE IMÁGENES

Figura 1: Ubicación dique Los Alazanes .....	8
Figura 2: Vertedero lateral del Dique Los Alazanes .....	9
Figura 3: Vista actual del Dique Los Alazanes .....	9
Figura 4: Rotura vertedero .....	10
Figura 5: Vertedero cresta delgada .....	14
Figura 6: Vertedero cresta delgada sin contracciones .....	15
Figura 7. Vertedero rectangular con y sin contracciones .....	16
Figura 8: Vertedero triangular.....	17
Figura 9: Vertedero trapezoidal .....	17
Figura 10: Vertedero cresta delgada con contracciones.....	18
Figura 11: Formas de la vena líquida.....	19
Figura 12: Vertedero rectangular (a) cresta delgada (b) cresta gruesa .....	20
Figura 13: Vertedero con perfil Creager.....	20
Figura 14: Cuenca de aporte al Dique Los Alazanes.....	29
Figura 15: Curvas SCS - CN .....	32
Figura 16: IDT Los Alazanes .....	35
Figura 17: Lluvia de diseño con duración 1 hr.....	36
Figura 18: Lluvia de diseño para duración 3 hr .....	37
Figura 19: Resultado lluvia de 60 min, TR 25 años y tc: 60 min .....	38
Figura 20: Resultado lluvia de 60 min, TR 50 años y tc: 60 min .....	38
Figura 21: Resultado lluvia de 60 min, TR 100 años y tc: 60 min .....	39
Figura 22: Resultado lluvia de 60 min, TR 25 años y tc: 83 min .....	39
Figura 23: Resultado lluvia de 60 min, TR 50 años y tc: 83 min .....	39
Figura 24: Resultado lluvia de 60 min, TR 100 años y tc: 83 min .....	40
Figura 26: Resultado lluvia de 180 min, TR 50 años y tc: 60 min .....	40
Figura 25: Resultado lluvia de 180 min, TR 25 años y tc: 60 min .....	40
Figura 27: Resultado lluvia de 180 min, TR 100 años y tc: 60 min .....	41
Figura 28: Resultado lluvia de 180 min, TR 25 años y tc: 83 min .....	41
Figura 29: Resultado lluvia de 180 min, TR 50 años y tc: 83 min .....	41
Figura 30: Resultado lluvia de 180 min, TR 100 años y tc: 83 min .....	42
Figura 31: Vertedero triangular calibrado.....	43
Figura 32: Equipo de bombeo .....	44
Figura 33: Curva H-Q prototipo.....	44
Figura 34: Curva H-Q modelo.....	45
Figura 35: Limnímetro .....	46
Figura 36: Nivelación costillas .....	47
Figura 37: Construcción.....	48
Figura 38: Vista desde aguas arriba y aguas abajo.....	49
Figura 39: Vertedero .....	49
Figura 40: Relleno costillas.....	50
Figura 41: Esquema sistema PIV .....	51
Figura 42: Volumen de medición .....	53
Figura 43: Orientación hacia abajo 3D .....	54
Figura 44: Partes FlowTracker .....	56
Figura 45: Lectura liras .....	57

Figura 46: Ubicación tomas.....	58
Figura 47: Sensor PASCO - Partes.....	58
Figura 48: Sensor ADV.....	60
Figura 49: ADV.....	60
Figura 50: Ubicación de las 3 posiciones.....	60
Figura 51: Cámara para filmar aguas arriba.....	61
Figura 52: Sembrado.....	61
Figura 53: Interface PIVlab.....	62
Figura 54: Interface RIVeR.....	63
Figura 55: Ubicación de las 3 posiciones.....	64
Figura 56: Equipamiento FlowTracker.....	64
Figura 57: Ubicaciones azud.....	65
Figura 58: Posiciones donde se midió altura de lámina.....	65
Figura 59: Relación H-Q en la salida del vertedero.....	67
Figura 60: Relación H-Q en el centro del vertedero.....	67
Figura 61: Relación H-Q en la cresta del vertedero.....	67
Figura 62: Curva H-Q aproximada de manera polinómica.....	70
Figura 63: Curva H-Q aproximada de manera potencial.....	70
Figura 64: Curva H-Q comparación de distintas aproximaciones.....	70
Figura 65: Velocidades compuestas ensayos FlowTracker.....	72
Figura 66: Velocidades compuestas ensayos ADV.....	72
Figura 68: Perfil de velocidades Ensayo 12.....	73
Figura 67: Líneas de corriente Ensayo 12.....	73
Figura 69: Comparación velocidades ADV-PIV.....	74
Figura 70: Líneas de corriente Ensayo 13.....	75
Figura 71: Perfil de velocidades Ensayo 13 a 13 cm.....	75
Figura 72: Perfil de velocidades Ensayo 13 a 23 cm.....	76
Figura 73: Comparación velocidades ADV-PIV.....	77
Figura 74: Comparación velocidades FlowTracker-PIV.....	77
Figura 75: Campo de velocidades - Ensayo 10.....	79
Figura 76: Perfil de velocidades en la salida del vertedero– Ensayo 10.....	80
Figura 77: Perfil de velocidades en la cresta del vertedero– Ensayo 10.....	80
Figura 78: Perfil de velocidades en el centro del vertedero– Ensayo 10.....	81
Figura 79: Campo de velocidades Ensayo 8.....	82
Figura 81: Perfil de velocidades a la salida - Ensayo 8.....	83
Figura 82: Perfil de velocidades en el centro - Ensayo 8.....	83
Figura 83: Distintas condiciones (a) talud en posición A, (b) talud en posición B, (c) sin talud..	86
Figura 84: Presiones medidas en la toma 25, Ensayo 18.....	87

## INDICE TABLAS

Tabla 1: Valores característicos de Cd.....	17
Tabla 2: Coeficiente de fórmula de Kerby-Kirpich .....	31
Tabla 3: Valores de referencia curva CN .....	33
Tabla 4: Lluvias de diseño mediante bloques alternos duración 1 hr.....	36
Tabla 5: Lluvias de diseño mediante bloques alternos duración 3 hr.....	37
Tabla 6: Resumen caudales resultantes de HEC-HMS .....	42
Tabla 7: Caudales a partir de la Hlimn por medio del uso del vertedero triangular calibrado...	45
Tabla 8: Resumen ensayos realizados.....	59
Tabla 9: Mediciones de lámina sobre vertedero .....	66
Tabla 10: Promedio de altura de láminas con su caudal correspondiente.....	66
Tabla 11: Caudales obtenidos a partir de lectura limnómetro .....	68
Tabla 12: Relación altura caudal .....	69
Tabla 13: Comparación entre H-Q y aproximaciones .....	69
Tabla 14: Resultado de velocidades ensayos ADV .....	71
Tabla 15: Resultado de velocidades ensayos FlowTracker .....	71
Tabla 16: Comparación de velocidades PIV-ADV Ensayo 12.....	74
Tabla 17: Comparación de velocidades PIV-FlowTracker Ensayo 13 .....	76
Tabla 18: Comparación de velocidades PIV-ADV Ensayo 13.....	77
Tabla 19: Velocidades sobre el vertedero a partir de medición lamina .....	79
Tabla 20: Diferencia de presiones entre tomas en la misma sección.....	85
Tabla 21: Presiones tomas sobre vertedero .....	85
Tabla 22: Presiones medidas en la T20, T21, T23, T24 y T25 .....	87
Tabla 23: Análisis número de Weber .....	89
Tabla 24: Análisis número de Reynold .....	91



## 1. INTRODUCCION

La presente práctica supervisada se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN), bajo el acompañamiento del Mg. Ing. Matías Eder y la Dra. Ing. Leticia Terrab. Se trabajó en el modelo físico de Los Alazanes construido en el laboratorio, ubicado sobre Bv. Dr. Juan Filloy dentro de Ciudad Universitaria.

El Laboratorio de Hidráulica, perteneciente al departamento de hidráulica de la FCEFyN de la UNC, fue creado a mediados de la década del 1940 y presta servicios académicos a la Universidad Nacional de Córdoba UNC. Realiza actividades de investigación científico-tecnológico financiada por proyectos provinciales de la Agencia Córdoba Ciencia, nacionales de CONICET, Agencia Nacional de Promoción Científica, SECYT e Internacionales para la Unión Europea. Los servicios técnicos y de consultoría especializada en hidráulica se han realizado para numerosas Direcciones Provinciales del País, y los principales organismos Nacionales. Para los cuales se han realizados numerosos modelos físicos reducidos a fondo fijo y móvil de obras y estructuras hidráulicas, incluyendo presas, azudes, sifones, vertederos, alcantarillas, disipadores de energía, como así también modelos fluviales bidimensionales y tridimensionales. Adicionalmente se realizan tareas de reparación y calibración de instrumental hidrométrico. El laboratorio cuenta con equipamiento propio para realizar estudios experimentales y de campo, cuenta con un canal de vidrio de pendiente variable, instrumental hidrométrico de campo y laboratorio como limnómetros ópticos, limnómetros digitales, vertederos de aforo, molinetes y micro molinetes, velocímetro acústico Doppler 3D, tubos Pitot, instrumental de mediciones limnológicas y sedimentológicas, etc.

### 1.1. DIQUE LOS ALAZANES

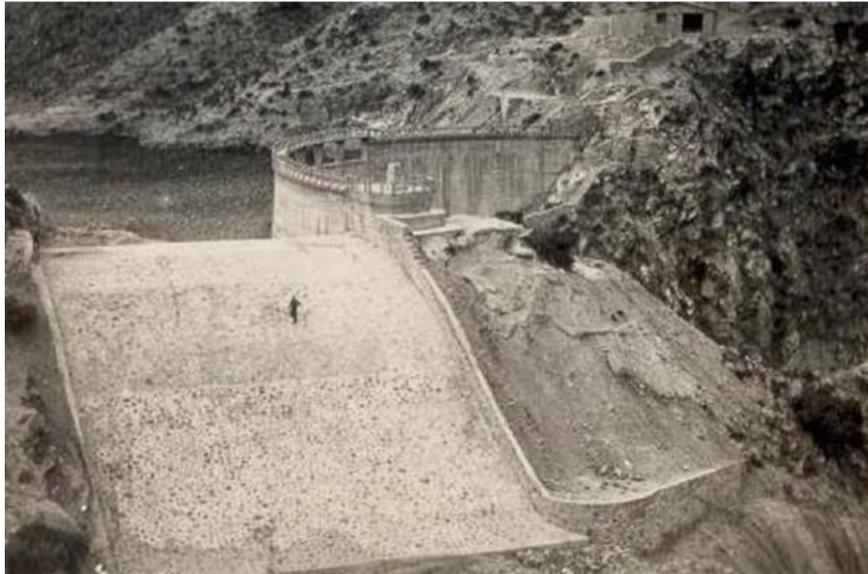
La Practica Supervisada se centra en el estudio experimental del Dique Los Alazanes, llevado a cabo en el modelo físico, este dique se encuentra aguas arriba de la localidad de Capilla del Monte, a aproximadamente 10 km, como se observa en la Figura 1. Fue construido entre los años 1939 y 1944 para abastecer de agua potable a la localidad mencionada, a 1400 msnm.



Figura 1: Ubicación dique Los Alazanes

Actualmente, se aprovecha el dique como una atracción turística para fines recreativos, como ser pesca de trucha, excursiones que pueden ser a pie o a caballo.

Este dique está constituido por una presa de arco de 71 m de longitud y 25 m de altura, con vertedero sobre la presa (funciona para eventos extraordinarios) y un vertedero fuera de la presa (funciona para eventos ordinarios) ubicado sobre la margen derecha de la presa, este último es el que se estudió. En la Figura 2 se observa el dique en sus inicios y en la Figura 3 como se encuentra actualmente.



**Figura 2: Vertedero lateral del Dique Los Alazanes**



**Figura 3: Vista actual del Dique Los Alazanes**

## 1.2. MOTIVACION

El estudio se llevó a cabo debido a que, por las lluvias del verano de 2015, se produjo la rotura por erosión del material que protegía la fundación del extremo izquierdo del canal de restitución del vertedero y la fundación del muro lateral de la margen izquierda del arroyo. En la Figura 4 se puede ver la rotura de la parte inferior del vertedero lateral.



**Figura 4: Rotura vertedero**

Debido a lo mencionado, se le solicitó al Laboratorio de Hidráulica la construcción de un modelo físico, para la evaluación de distintos aspectos hidrológicos, para evitar futuras erosiones, así como asegurar un correcto funcionamiento del vertedero. También, se prevé el estudio de un azud aguas abajo, para ver la eficacia o no de su colocación.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

Caracterizar, mediante estudios experimentales, la hidrodinámica del flujo en el modelo físico de la presa Los Alazanes.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

- Capacitar al estudiante en el área de la hidráulica experimental aplicada a modelos físicos.
- Analizar e interpretar los resultados experimentales.
- Aplicar (trasponer) los resultados obtenidos en el modelo al prototipo.

### 1.3.3. OBJETIVOS PERSONALES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

- Lograr una interacción permanente con un grupo de profesionales aplicados a la ingeniería hidráulica.
- Alcanzar un desarrollo personal y profesional en un ámbito de trabajo cotidiano.
- Redactar un informe que sintetice el trabajo realizado y que sea de utilidad para próximos estudios e investigaciones.
- Aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

## 1.4. METODOLOGIA

Este informe se desarrolla en cinco capítulos:

**Capítulo 1 – “Introducción”:** Se presenta un resumen de la práctica supervisada y el ámbito de trabajo. Así como también los objetivos y motivaciones de esta.

**Capítulo 2 – “Marco Teórico”:** Se desarrollan conceptos teóricos que serán de utilidad para la comprensión de los trabajos realizados. Estos son: Obras de Descarga, Modelación Física y Caracterización Hidrológica de Cuencas.

**Capítulo 3 – “Estudio Hidrológico”:** Se presenta el estudio hidrológico de la cuenca de Dique Los Alazanes y los resultados obtenidos.

**Capítulo 4 – “Materiales y Métodos”:** Se describe el equipamiento perteneciente al Laboratorio de Hidráulica de la U.N.C. y la metodología que se utilizó en los ensayos realizados, junto con el instrumental necesario.

**Capítulo 5 – “Resultados”:** Se muestran los resultados obtenidos en los ensayos que fueron realizados y en el procesamiento de los datos.

**Capítulo 6 – “Conclusiones”:** Se obtienen conclusiones en cuanto a los ensayos realizados, las técnicas aplicadas, los resultados y también conclusiones personales de la práctica supervisada.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. OBRAS DE DESCARGA

*La función de una obra de descarga en una presa de almacenamiento o de derivación consiste en dejar salir el flujo de agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para el almacenamiento, y en el caso de una presa derivadora, dejar pasar los excedentes que no se envían al sistema de derivación.*

*El tamaño del almacenamiento es un factor importante que se debe considerar, éste se encuentra en función de varios factores:*

- o Avenida de diseño*
- o Características del embalse*
- o Programa de operación de la obra*

#### 2.1.1. PARTES QUE CONSTITUYEN UNA OBRA DE DESCARGA

Una obra de descarga está constituida por las siguientes partes:

- Canal de acceso

Conduce el agua desde el almacenamiento hasta la estructura de control, de manera que llegue en dirección perpendicular a la cresta en toda su longitud y libre de turbulencias a fin de lograr el coeficiente de descarga máximo y el mínimo de problemas en la estructura de control.

No se reviste en su mayor longitud, es por esto que las velocidades a lo largo de este canal deberán limitarse, ya que se puede erosionar. Las curvaturas y transiciones deberán hacerse de forma gradual, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga a lo largo del canal.

- Estructuras de control (vertedero/orificios)

Estas se encargan de regular las descargas del almacenamiento. La regulación puede efectuarse mediante una sección de control constituida por un simple umbral, un orificio, o una tubería, que pueden descargar libremente o sumergidos y estar controlados o no por compuertas. En cualquier caso, es muy importante lograr la mayor eficiencia de la estructura de control, con un coeficiente de descarga lo más grande posible para que la descarga sea máxima y así evitar el despegue de la lámina vertiente sobre la cresta.

Las estructuras de control pueden tomar varias formas tanto en su posición como en su figura. En planta los vertederos pueden ser rectos, curvos, semicirculares, en forma de U o redondos. En el caso de los orificios, éstos pueden ser horizontales, inclinados o verticales, y en su forma pueden ser circulares, cuadrado, rectangular o de forma irregular.

- Conducto de descarga

Permite conducir los volúmenes que han pasado por la estructura de control, hasta el río aguas abajo de la presa. Dicho conducto puede ser canal a cielo abierto, o bien un conducto cerrado, o una combinación de ambas. La selección del tipo y dimensiones están regidos por las consideraciones hidráulicas, económicas, topográficas y geológicas del sitio.

- Estructura terminal

Se ubica al final del conducto de descarga y permite la restitución de las descargas del vertedor al río, disipando la energía cinética excedente que adquiere el agua en su descenso desde el embalse hasta el río aguas abajo, o bien lanzando el agua directamente al río para lograr su disipación, aunque esta ocurra fuera de la estructura terminal.

El objetivo es alcanzar una disipación eficaz de la energía y eliminar la erosión en la zona de la caída.

- Canal de salida

El canal de salida es la estructura que capta el agua que sale de la estructura terminal; su función es la de conducir el agua nuevamente al río. (No siempre se requiere construir un canal de salida, esto depende de las condiciones topográficas, de la calidad de la roca, de la disposición de otras estructuras, etc.). Esta estructura no se reviste.

## 2.1.2. DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LA PRÁCTICA SUPERVISADA

### 2.1.2.1. VERTEDEROS

Un vertedero (Figura 5) es un muro o una barrera que se interpone al flujo, causando sobre-elevación del nivel de la lámina aguas arriba y disminución aguas abajo. Las principales funciones de los vertederos son:

- Control de nivel en embalses, canales, depósitos, estanques, etc.
- Aforo o medición de caudales
- Elevar el nivel del agua
- Evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudal

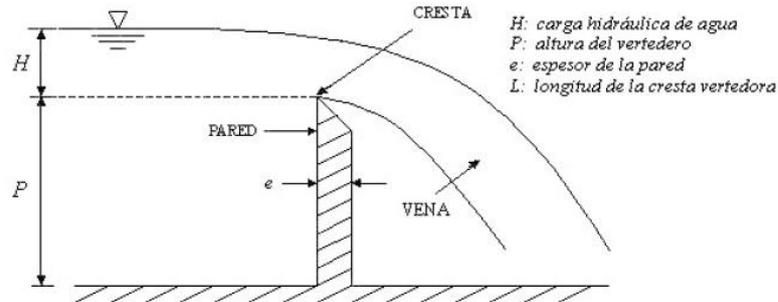


Figura 5: Vertedero cresta delgada

La ecuación para obtener el caudal es la siguiente:

$$Q = K * H^m \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal

K = Constante de calibración

H = Carga hidráulica

m = exponente

Para determinar dicho caudal se considera la ecuación de energía (Bernoulli) entre 2 puntos, uno muy alejado ( $V=0$ ) y uno por sobre la cresta. Además, se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- Distribución hidrostática de presiones
- Las pérdidas por fricción y locales entre 1 y 2 son despreciables
- La tensión superficial es despreciable
- El flujo aguas abajo de la estructura (vena) debe ser libre (no ahogado) para garantizar que la presión en la vena sea la atmosférica (chorro libre)

A continuación, se deducen las ecuaciones para el cálculo del caudal, según el tipo de vertedero.

### Clasificación de los vertederos según su forma geométrica:

- Vertederos Rectangulares:

#### A. *Vertederos de pared delgada sin contracciones*

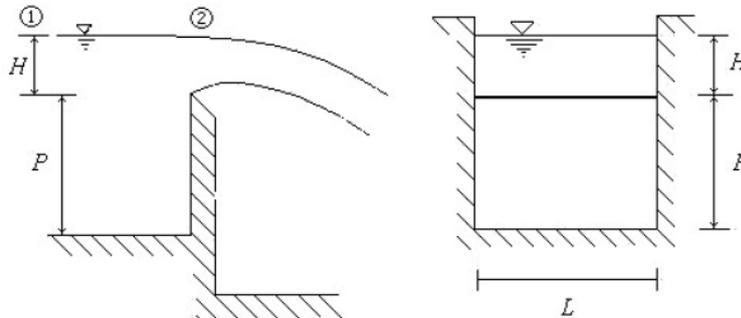


Figura 6: Vertedero cresta delgada sin contracciones

Aplicando la ecuación de energía entre los puntos 1 y 2 (Figura 6), se obtiene una expresión para el caudal:

$$Qt = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L \left( H + \frac{v^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Donde:

Qt = Caudal teórico

L = longitud del vertedero

H = carga hidráulica

V = velocidad de llegada

g = aceleración debida a la gravedad

La ecuación anterior no considera las pérdidas por fricción en el tramo, ni los efectos de tensión superficial, por lo tanto, el caudal real es menor que el caudal teórico, por tal razón se introduce un coeficiente que permita incluir estas consideraciones, como se indica en la ecuación:

$$Qt = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L C_d \left( H + \frac{v^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Cd = coeficiente de descarga

Los valores característicos de este coeficiente deben estar entre 0.55 y 0.65.

Despreciando la influencia de la velocidad de llegada al vertedor, la ecuación se simplifica de la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

(Sotelo Avila, 1982) presenta ecuaciones que permiten calcular los coeficientes de descarga para vertederos rectangulares con contracciones o sin ellas y también para vertederos triangulares.

**B. Vertederos de pared delgada con contracciones**

Para esta situación, la longitud efectiva del vertedero es  $L'$ .

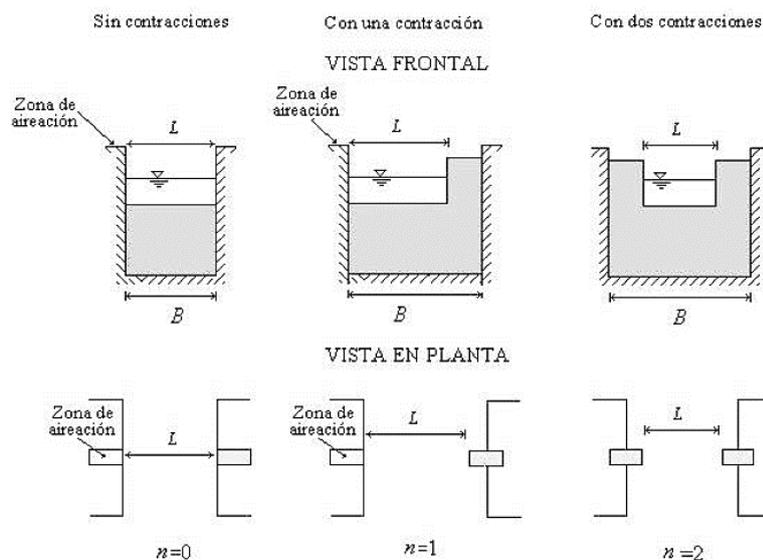
$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L' H^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

El efecto de la contracción se tiene en cuenta restando a la longitud total de la cresta del vertedero  $L$ , el número de contracciones multiplicada por  $0.1H$ .

$$L' = L - n(0,1H) \quad (6)$$

Entonces:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d (L - n(0,1H)) H^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$



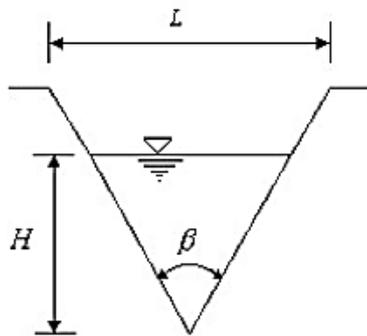
**Figura 7. Vertedero rectangular con y sin contracciones**

La Figura 7 muestra una vista frontal y una vista en planta de vertederos rectangulares con contracciones en las cuales  $n$  indica la cantidad de contracciones.

Para el caso del vertedero sin contracciones laterales ( $n = 0$ ), se requiere de una zona de aireación en los extremos de la estructura que permita el ingreso de aire para garantizar que la presión aguas abajo de la estructura sea la atmosférica.

▪ Vertederos triangulares:

Cuando los caudales son pequeños es conveniente aforar usando vertederos en forma de V (Figura 8) puesto que para pequeñas variaciones de caudal la variación en la lectura de la carga hidráulica  $H$  es más representativa. En la tabla 1 se observan los distintos valores a adoptar de  $C_d$  en función del ángulo del vertedero.



ÁNGULO $\beta$	$C_d$
15°	0.52-0.75
30°	0.59-0.72
45°	0.59-0.69
60°	0.50-0.54
90°	0.50-0.60

Tabla 1: Valores característicos de  $C_d$

Figura 8: Vertedero triangular

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left( \text{tg} \frac{\beta}{2} \right) H^{\frac{5}{2}} \quad (8)$$

Donde si  $\beta = 90$  entonces  $Q = 1.4 H^{\frac{5}{2}}$

▪ Vertederos trapezoidales:

Este vertedero (Figura 9) se ha diseñado con el fin de disminuir el efecto de las contracciones que se presentan en un vertedero rectangular contraído.

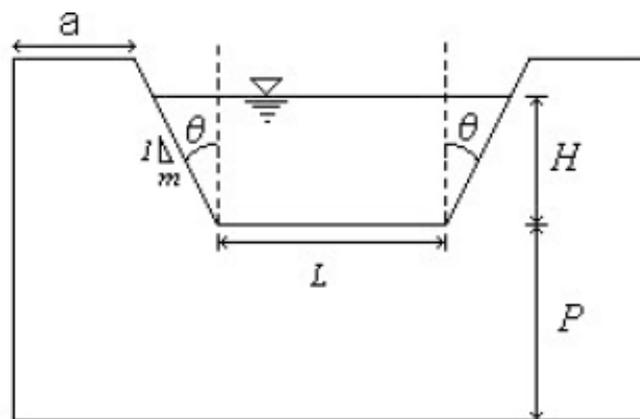


Figura 9: Vertedero trapezoidal

$$Q = \frac{2}{3} C_{d1} \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} H^{\frac{5}{2}} \text{tg}(\theta) \quad (9)$$

Donde:

$C_{d1}$  = coeficiente de descarga para el vertedero rectangular con contracciones

$C_{d2}$  = coeficiente de descarga para el vertedero triangular

$L$  = longitud de la cresta

$\theta$  = Angulo de inclinación de los lados respecto a la vertical

$m$  = inclinación lateral

La ecuación anterior puede transformarse de la siguiente manera:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left( C_{d1} + \frac{4H}{5L} C_{d2} \operatorname{tg} \theta \right) L H^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

Cuando la inclinación de los taludes laterales es de 4V:1H, el vertedero recibe el nombre de Cipolletti en honor a su inventor. La geometría de este vertedero ha sido obtenida de manera que las ampliaciones laterales compensen el caudal disminuido por las contracciones de un vertedero rectangular con iguales longitud de cresta y carga de agua.

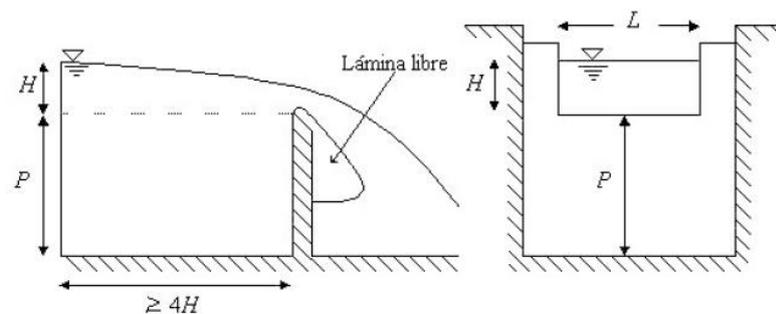
(Sotelo Avila, 1982) afirma que el término entre paréntesis de la ecuación es de 0.63 lo que conduce a la siguiente ecuación, en sistema M.K.S

$$Q = 1,861 L H^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

#### Clasificación según el ancho de la cresta:

- Cresta delgada:

Este tipo de vertedero (Figura 10) es el más usado, especialmente como aforador, por ser una estructura de fácil construcción e instalación. Si son debidamente calibrados se obtienen ecuaciones o curvas en las cuales el caudal es función de la carga hidráulica  $H$ .



**Figura 10: Vertedero cresta delgada con contracciones**

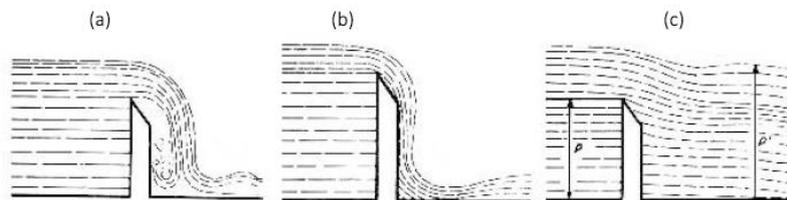
La ecuación que plantea (Azevedo y Acosta, 1976) es:

$$Q = 1,84 L H^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

### ***Influencia de la forma de la vena:***

El funcionamiento de los vertederos de pared delgada puede variar según la forma de la vena o chorro aguas abajo de la estructura, en situaciones en que no toda la lámina esté en contacto con la presión atmosférica, modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal. Es por ello que cuando el vertedero es usado para medición de caudales se debe evitar la situación anterior.

Esta influencia se puede presentar en vertederos sin contracción lateral que no dispongan de una adecuada aireación. En estas circunstancias la lámina líquida puede tomar una de las formas siguientes:



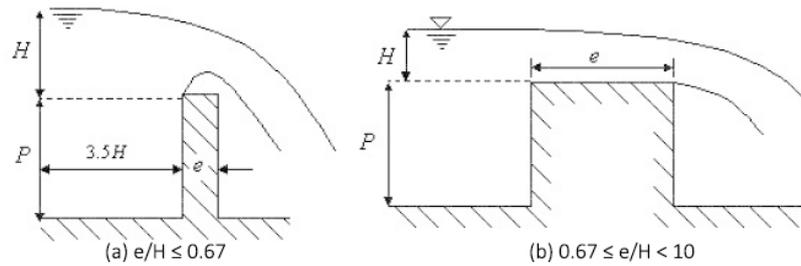
**Figura 11: Formas de la vena líquida**

Viendo la Figura 11, podemos definir:

- Lámina deprimida:* El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial aguas abajo de la estructura, que modifica la posición de la vena, el caudal es mayor al previsto teóricamente.
- Lámina adherente:* Ocurre cuando el aire sale totalmente. En esta situación el caudal también es mayor.
- Lámina ahogada:* Cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta  $P' > P$ . Los caudales disminuyen a medida que aumenta la sumersión. En esta situación el caudal se puede calcular, teniendo como base los valores relativos a la descarga de los vertederos libres aplicándoles un coeficiente de reducción, que se obtiene de la siguiente tabla:

#### ➤ Cresta ancha:

Los vertederos de cresta ancha (Figura 12) tienen menor capacidad de descarga para igual carga de Agua que los vertederos de cresta delgada y su uso más frecuente es como estructuras de control de nivel.



**Figura 12: Vertedero rectangular (a) cresta delgada (b) cresta gruesa**

**Comparación entre vertedero de cresta delgada y cresta ancha:**

(Sotelo Avila, 1982) presenta una clasificación del funcionamiento de los vertederos, según la Relación  $e/H$ , como se presenta a continuación:

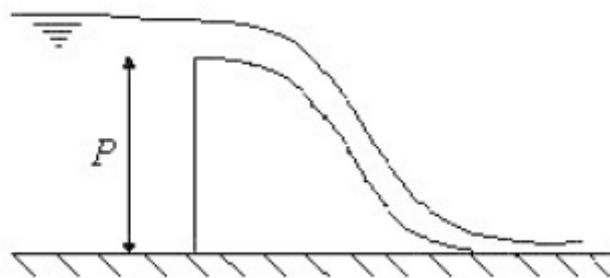
- Cuando  $e/H$  es menor que 0.67 el chorro se separa de la cresta y el funcionamiento es idéntico al del vertedero de pared delgada.
- Cuando  $e/H$  es mayor a 0.67 el funcionamiento es diferente, pues la lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedero.
- Si la relación  $e/H$  es mayor a 10 se considera que el funcionamiento es en canal.

(Azevedo y Acosta, 1976) proponen, para el sistema M.K.S.:

$$Q = 1,71 L H^2 \quad (13)$$

➤ Perfil Creager:

Este tipo de vertedero (Figura 13), se usa para evacuar caudales de creciente, pues la forma especial de su cresta permite la máxima descarga, al compararlo con otra forma de vertederos, para igual altura de carga de agua.



**Figura 13: Vertedero con perfil Creager**

En cuanto a la ecuación para calcular el caudal, (Azevedo y Acosta, 1976) proponen, en sistema M.K.S.:

$$Q = 2,2 L H^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

**Requisitos generales para la instalación de un vertedero:**

- El vertedero deberá ubicarse en canales de sección uniforme y alineamiento recto aguas arriba, en una longitud mayor de  $20H$ .
- El vertedero debe instalarse normalmente al flujo y la cresta debe estar perfectamente lisa y nivelada.
- La lectura de la carga  $H$  sobre la cresta se mide con una regla graduada o limnómetro ubicado por lo menos a una distancia 3.5 veces la carga máxima hacia aguas arriba.
- Para asegurar su funcionamiento con descarga libre, debe instalarse un dispositivo de ventilación que comunique la cara aguas abajo del vertedero con la atmósfera.
- Si la instalación del vertedero es permanente, debe dejarse un dispositivo de drenaje para evacuar los sedimentos depositados.
- Se recomienda que la cresta sea de material resistente a la corrosión como bronce, acero, plástico y con la arista viva.

**2.1.2.2. CURVA ALTURA-CAUDAL**

Para poder obtener la curva H-Q del vertedero, lo que se hizo fue para distintos caudales, uno por ensayo, medir la altura de la lámina en la cresta del vertedero. A la vez, se colocó un limnómetro en el vertedero triangular, ya que este se encuentra calibrado, es decir tenemos la ecuación de este y con las distintas lecturas podemos obtener el caudal correspondiente a cada ensayo.

## 2.2. MODELACION FISICA

Para que un modelo físico represente en adecuada escala los fenómenos hidrodinámicos presentes en el prototipo deben cumplirse ciertas reglas, que se denominan condiciones de semejanza.

La ley de escalas de cada modelo físico depende del tipo de fuerzas activas que predomina respecto de las demás, resultando entonces modelos según la ley de Froude (cuando predominan las fuerzas gravitacionales), modelos de Reynolds (cuando predominan las fuerzas viscosas), modelos de Weber (cuando predominan las fuerzas capilares) o modelos de Cauchy (cuando predominan las fuerzas elásticas).

Mediante el uso del análisis dimensional, las variables que tienen relevancia en el proceso en estudio están agrupadas sistemáticamente en parámetros adimensionales que las contienen. Las relaciones de escala resultan entonces de considerar que esos parámetros adimensionales deben ser los mismos en prototipo y en modelo. En otras palabras, la escala de cada parámetro

adimensional debe ser igual a la unidad. Este método tiene la ventaja de que "siempre" puede ser aplicado y algunas desventajas como:

- Depende demasiado de la selección adecuada de variables involucradas y
- No permite apreciar adecuadamente el carácter y magnitud de posibles "efectos de escala", (Lopardo, 2005 (b)).

A continuación, se presenta el teorema  $\pi$  o de Vaschy-Buckingham (el cual es considerado la clave del análisis dimensional), los parámetros adimensionales, criterios de similitud y finalmente las consideraciones que se deben realizar para modelar diferentes condiciones hidráulicas. Este apartado se desarrolló basado en el libro de Ramón Fuentes "Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño", (2002).

### 2.2.1. ANALISIS DIMENSIONAL – TEOREMA $\pi$ O DE VASCHY BUCKINGHAM

*El teorema  $\pi$  expresa que "dada una relación dimensional homogénea entre  $n$  variables, ella podrá expresarse a través de una relación entre  $p = n - r$  productos adimensionales, donde  $p$  es el número de productos que forman un conjunto completo de productos adimensionales de variables en juego, y donde  $r$  puede definirse como el número de dimensiones fundamentales".*

Supongamos un fenómeno en el cual intervienen  $A_1, A_2, A_3... A_n$  variables dimensionales homogéneas implicadas, tales como la presión, viscosidad, velocidad, densidad, etc. Entonces, si se sabe que todas las cantidades son esenciales a la solución y que entre todas estas variables tenemos  $r$  dimensiones fundamentales, podremos encontrar  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, ... \pi_{n-r}$  relaciones adimensionales.

El método para determinar los parámetros  $\pi$ , consiste en seleccionar  $r$  de las cantidades  $A$  que contengan entre ellas las  $r$  dimensiones fundamentales y usar a las mismas como variables repetitivas, junto con una de las otras  $A$  cantidades para cada  $\pi$ .

Por ejemplo, sea que  $A_1, A_2, A_3$  contengan las  $r$  dimensiones fundamentales  $M$  (masa),  $L$  (longitud),  $T$  (tiempo). Entonces el primer parámetro  $\pi$  está compuesto como:

$$\pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4 \quad (15)$$

El segundo como

$$\pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5 \quad (16)$$

y así hasta

$$\pi_{n-r} = A_1^{x_{n-r}} A_2^{y_{n-r}} A_3^{z_{n-r}} A_n \quad (17)$$

En estas ecuaciones se determinarán los exponentes para que cada  $\pi$  sea adimensional.

Las dimensiones de las cantidades  $A$  se sustituyen y los exponentes de  $M, L, T$  para cada  $\pi_i$  se fijan iguales a cero respectivamente, estos producen tres ecuaciones con tres incógnitas para cada parámetro  $\pi$ , con lo que se pueden determinar los exponentes  $x_i, y_i, z_i$  y de aquí los parámetros adimensionales ( $\pi_i$ ).

## 2.2.2. PARAMETROS ADIMENSIONALES

A continuación, se presentan los parámetros adimensionales más importantes:

- Número de Froude: Relación de las fuerzas de inercia a las gravitatorias, flujo con superficie libre:

$$F_r = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de la gravedad}} = \frac{V_m}{\sqrt{g h}} \quad (18)$$

Donde: g= aceleración de la gravedad

- Número de Reynolds: Relación de las fuerzas de inercia a las viscosas, flujo laminar/turbulento:

$$R_e = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{\rho V_m l}{\mu} \quad (19)$$

Donde: l= longitud característica

$\mu$ = viscosidad del fluido

$\rho$ = densidad del fluido

- Número de Weber: Relación de las fuerzas de inercia a la tensión superficial, flujo con interfaz de dos fluidos:

$$W_e = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de tensión superficial}} = \frac{\rho V_m^2 l}{\sigma} \quad (20)$$

Donde:  $\sigma$ = tensión superficial

- Número de Mach: Relación de las fuerzas de inercia a la fuerza elástica que resiste la compresión, flujo compresible:

$$M = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza elástica que resiste la compresión}} = \frac{V_m}{\sqrt{E_v/\rho}} \quad (21)$$

Donde:  $E_v$ = módulo de elasticidad

- Número de Euler: Relación entre la pérdida de presión respecto a la energía cinética:

$$E = \frac{\text{Pérdida de presión}}{\text{Energía cinética volimétrica}} = \frac{\Delta p}{\rho V_m^2} \quad (22)$$

Donde:  $\Delta p$ = variación de presión

### 2.2.3. SIMILITUD Y MODELOS

El supuesto de que un fenómeno hidráulico se puede reproducir a través de la construcción y operación de un sistema más pequeño llamado modelo reducido nos lleva a preguntarnos cuáles son las condiciones que se deben cumplir para que esa esperada similitud se cumpla. A continuación, se presentan los diferentes tipos de similitudes que existen y deben cumplirse entre el modelo y el prototipo, (Vergara, 1995).

#### Similitud Geométrica

Implica que la proporción de todas las longitudes correspondientes, en los dos sistemas, deben ser las mismas. Es decir, dos objetos son geoméricamente similares si las razones de sus dimensiones correspondientes son iguales. Por esto la similitud geométrica se refiere solo a similitud de forma.

$$\frac{l_{\text{modelo}}}{l_{\text{prototipo}}} = Cte = \lambda_L \quad (23)$$

#### Similitud Cinemática

Se dice que dos fenómenos tienen similitud cinemática cuando además de la similitud geométrica tiene proporcionalidad e idéntica orientación de los vectores velocidad en todos los puntos homólogos.

$$\text{Velocidad} \quad \frac{V_{\text{modelo}}}{V_{\text{prototipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}/T_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}/T_{\text{prototipo}}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} \quad (24)$$

$$\text{Aceleración} \quad \frac{a_{\text{modelo}}}{a_{\text{prototipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}/T_{\text{modelo}}^2}{L_{\text{prototipo}}/T_{\text{prototipo}}^2} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T^2} \quad (25)$$

$$\text{Caudal} \quad \frac{Q_{\text{modelo}}}{Q_{\text{prototipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}^3/T_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}^3/T_{\text{prototipo}}} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_T} \quad (26)$$

#### Similitud Dinámica

Dos fenómenos son dinámicamente semejantes si con la semejanza cinemática tiene lugar la proporcionalidad y orientación igual de las vectores fuerzas en todos los puntos homólogos de dichos fenómenos, hablando en rigor, la semejanza dinámica se consigue solo si tiene lugar la semejanza completa de fenómenos, es decir todas las magnitudes físicas similares son iguales en todos los puntos correspondientes.

Entonces podemos decir que dos movimientos son dinámicamente similares si:

- o Las razones de las masas de los objetos involucrados son iguales
- o Las razones de la fuerza que afectan al movimiento son iguales

Las condiciones requeridas para la semejanza completa se obtienen a partir de la segunda ley de Newton,  $\sum F_i = M \times a$ . Las fuerzas que actúan pueden ser cualquiera de las siguientes, o una combinación de estas:

- ✓ Fuerzas Viscosas
- ✓ Fuerzas de Presión
- ✓ Fuerzas Gravitatorias
- ✓ Fuerzas de Tensión Superficial
- ✓ Fuerzas Elásticas

Entre modelo y prototipo se desarrolla la siguiente relación de fuerzas:

$$\frac{\sum \text{Fuerzas (viscosas, de presión, gravitatorias, tensión sup., elásticas)}_{\text{modelo}}}{\sum \text{Fuerzas (viscosas, de presión, gravitatorias, tensión sup., elásticas)}_{\text{prototipo}}} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} \quad (27)$$

### Similitud Restringida y efectos de escala

“Obsérvese que, aunque la similitud geométrica y cinemática se pueden lograr en la generalidad de las situaciones del modelaje hidráulico, la similitud dinámica es un ideal que raramente se puede lograr en la práctica”, (Vergara, 1995). Si el modelo utiliza el mismo fluido y la atracción gravitatoria es la misma que en el prototipo, para cumplir con la similitud dinámica completa la escala de longitudes debe ser necesariamente igual a 1.

Entonces...“no es posible en general construir modelos en similitud absoluta, en el sentido de que cumplan rigurosamente con las condiciones de los  $\pi_{n-r}$  parámetros adimensionales. Pero ocurre felizmente, que la no identidad de algunos  $\pi$  en modelo y prototipo no influye apreciablemente sobre el resultado que se busca.”... (Fuentes, 2002) por tal motivo, bajo ciertas circunstancias, se pueden relajar algunos parámetros y realizar efectivamente los modelos de modo que sus resultados sean prácticamente representativos.

“Lo que ocurre frecuentemente en este aspecto es que fenómenos que son despreciables en el prototipo (ondas capilares, por ejemplo) influyen significativamente en el modelo. Se llama efectos de escala a estos efectos parásitos, ya que ellos dependen de las escalas consideradas y desaparecerían si el modelo y prototipo fuesen idénticos.”, (Fuentes, 2002).

### Paradoja de la Imposibilidad

“En la práctica no resulta posible en los más de los casos imponer la igualdad de todos los parámetros adimensionales. Esto se debe a que algunas escalas tienen valores fijos por consideraciones físicas, técnicas y/o económicas; por ejemplo, en los modelos hidráulicos o aerodinámicos, se usa habitualmente el mismo fluido (agua o aire) en modelo y prototipo, lo que conlleva a que la escala de viscosidad ( $\lambda_\mu$ ) y densidad ( $\lambda_\rho$ ) sean:

$$\lambda_\mu = \lambda_\rho \approx 1$$

Y si los ensayos se hacen sin introducir aceleraciones ficticias, normalmente se tendrá que la escala de aceleración de la gravedad ( $\lambda_g$ ):

$$\lambda_g = 1$$

Estas imposiciones adicionales limitan el diseño, dejando cada vez menos escalas libres y aún, en muchos casos de interés, conducen a que la escala de longitudes ( $\lambda_L$ ) sea:

$$\lambda_L = 1$$

Indicando que es imposible construir un modelo distinto en tamaño al prototipo. Este hecho se llama por razones obvias "*paradoja de la imposibilidad*". Una de las finalidades de la investigación en los laboratorios de modelos es encontrar métodos para salvar la paradoja de la imposibilidad. Entre los más usados, se encuentran la relajación de parámetros, la distorsión de escalas, la introducción de fuerzas externas ficticias, etc.", (Fuentes, 2002).

### Modelos de Euler o Eulerianos

"Supóngase ahora que existen rangos de los números de Reynolds y de Weber en los cuales su influencia es despreciable"... estos modelos en que la viscosidad y la tensión superficial no influirían, se llaman modelos de Euler, por la razón siguiente: si la viscosidad no influye entonces la ecuación de Navier-Stokes degenera en la de Euler para el fluido ideal. La existencia de modelos de este tipo no implica que la viscosidad sea idénticamente nula, si no más bien equivalente a introducir fuerzas externas ficticias en la ecuación de Euler, que no dependen del número de Reynolds, por ejemplo. Obviamente, este tipo de modelo será inconcebible para representar zonas en que la viscosidad desempeña un papel básico (capas límites)", (Fuentes, 2002).

#### 2.2.4. MODELOS DE ESCURRIMIENTO A SUPERFICIE LIBRE

Los escurrimientos a superficie libre se caracterizan por tener una presión constante e igual a la atmosférica en la superficie libre, y porque su principal fuerza motora es la gravedad. Por este motivo el número de Froude es de gran importancia en estos tipos de modelos.

El problema se plantea como el de un escurrimiento condicionado por la gravedad, la geometría y las capas límites:

$$\pi = \pi(Fr, \Gamma i, Re) \quad (28)$$

Para que los fenómenos representados sean hidráulicamente idénticos en modelo y prototipo, se deberá cumplir las siguientes condiciones:

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| ✓ Condición de Froude   | $Fr_{Prototipo} = Fr_{Modelo}$             |
| ✓ Similitud Geométrica  | $\Gamma i_{Prototipo} = \Gamma i_{Modelo}$ |
| ✓ Condición de Reynolds | $Re_{Prototipo} = Re_{Modelo}$             |

Ello implica que:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_g \lambda_L} \quad (29)$$

$$\Gamma i_{Prototipo} = \Gamma i_{Modelo}$$

$$\lambda_v \lambda_L = \lambda_v \quad (30)$$

Además, si el modelo es operado en la tierra y con el mismo fluido, entonces  $\lambda_g = \lambda_v = 1$  y por lo tanto  $\lambda_v = \lambda_L = 1$ , es decir que bajo las condiciones presentadas la similitud completa solo es posible si la escala de longitudes es 1, lo cual muestra la "paradoja de la imposibilidad" para modelos reducidos.

...“lo que se hace más frecuentemente para soslayar la paradoja de la imposibilidad es suponer que el modelo puede diseñarse como euleriano, esto es, que más allá de un cierto  $Re_0$  es posible relajar la condición de Reynolds, y respetar solamente:

Condición de Froude  $\lambda_v = \sqrt{\lambda_L}$

Similitud Geométrica  $\Gamma i_{Prototipo} = \Gamma i_{Modelo}$

Recuérdese que en la relación está incluida

$$\frac{k_{sPrototipo}}{L_{Prototipo}} = \frac{k_{sModelo}}{L_{Modelo}}$$

O sea:  $\lambda_{k_s} = \lambda_L$

Y la rugosidad debería escalarse, en rigor, como todas las longitudes”... (Fuentes, 2002).

- Escala de velocidades  $\lambda_v = \sqrt{\lambda_L}$
- Escala de Tiempo  $\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \sqrt{\lambda_L}$
- Escala de Caudales  $\lambda_Q = \lambda_L^2 \times \sqrt{\lambda_L} = \lambda_L^{5/2}$
- Escala de Presiones  $\lambda_P = \lambda_\rho \times \lambda_v^2 = \lambda_L$
- Escala de los Números de Re  $\lambda_{Re} = \lambda_v \times \lambda_L = \lambda_L^{3/2}$

### 3. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

En este capítulo se presenta el estudio hidrológico de la cuenca de aporte al Dique Los Alazanes, el mismo tiene como objetivo determinar caudales pico asociados a diferentes recurrencias.

En forma sintética a continuación se presenta la metodología aplicada:

- I. **Delimitación de cuencas:** a través de modelos digitales de terreno y de herramientas informáticas se procede a determinar las cuencas y subcuencas.
- II. **Determinación de parámetros morfométricos:** con la ayuda de herramientas informáticas y visitas a campo, se definen: áreas, pendientes de las cuencas; longitudes y pendientes de cauces principales; suelo y vegetación.
- III. **Determinación de parámetros hidrológicos:** en base a información recopilada en el lugar de estudio se definen: abstracciones iniciales, tiempos de concentración, tiempos de retardo, métodos de tránsito, números de curva (CN) de cada subcuenca.
- IV. **Definición de lluvia de diseño:** se definen aquí las lluvias de diseño que serán incorporadas a modelos de transformación lluvia caudal. Se analiza tanto la magnitud de la lámina como su distribución temporal y espacial.
- V. **Simulación hidrológica:** a través del programa HEC-HMS (desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos) se modelan las cuencas de interés con los parámetros antes definidos, para obtener los caudales de diseño empleando diferentes metodologías para la obtención de CNs.
- VI. **Resultados de la simulación:** se muestran los caudales obtenidos para cada una de las cuencas modeladas para diferentes tiempos de retorno.

#### 3.1. CUENCA HIDROGRÁFICA

La **cuenca hidrográfica** se encuentra definida por una sección de río, representa toda el área de contribución superficial en la que el agua escurre por gravedad hasta la sección del río, es decir, es una porción de la superficie terrestre en donde el agua que cae tiende a ser drenada por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Si la cuenca hidrográfica es muy grande, la misma puede estar conformada por subcuencas, estas se delimitan a partir de las cartas topográficas con curvas de nivel o a través de geoprocesamiento, se realiza diferenciando las áreas que contribuyen al punto de salida.

En la Figura 14 se presenta la cuenca de aporte al Dique Los Alazanes. La misma tiene un área de 11,7 Km<sup>2</sup> y fue definida a partir de información topográfica satelital provista por el modelo digital de elevación SRTM y se complementó el análisis con observaciones de imágenes satelitales provistas por Google Earth.



**Figura 14: Cuenca de aporte al Dique Los Alazanes**

### 3.2. PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DE LA CUENCA

Los parámetros morfométricos de las cuencas condicionan la relación entre la precipitación y el escurrimiento superficial. Entre ellos, se puede distinguir:

- *Área de drenaje (A)*: puede ser determinada con AutoCad, con un planímetro o por técnicas de geoprocésamiento. El área es la característica más importante de la cuenca, ya que refleja el volumen total de agua que puede ser generado por la cuenca.
- *Longitud del curso principal (L)*: el curso principal de una cuenca es aquel que drena la mayor área en el interior de la cuenca, es la corriente que pasa por la salida de la cuenca. Las demás corrientes de una cuenca se denominan tributarias. Hay varios indicadores del grado de bifurcación, como ser: orden de corrientes, densidad de corrientes y drenaje, pendiente del cauce principal.
- *Pendiente (S)*: es la diferencia de altitud entre el comienzo y el final del cauce, dividido por la longitud de drenaje. Infiuye en la velocidad con la cual ocurre el escurrimiento.
- *Cobertura vegetal*: está relacionado con el uso de suelo (sustitución de bosques y monte natural por pasturas o sembrado, urbanización, modificación de los caminos de escurrimiento) y los tipos de suelo (arenosos menor escurrimiento que arcillosos, y su profundidad).

En la siguiente tabla se presentan los principales parámetros de la cuenca de aporte al Dique Los Alazanes.

Área de la cuenca [km <sup>2</sup> ]	Cobertura Vegetal	Cauce principal		
		L [m]	ΔH [m]	S [m/m]
11,63	Pastizales	7160	334	0.046

### 3.3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA

Los principales parámetros hidrológicos de la cuenca son el tiempo de concentración, el tiempo de retardo y el valor de la curva número (CN) que representa la capacidad de infiltración de la cuenca.

- *Tiempo de concentración*: es el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Esta determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al mismo tiempo que máximo.

Para calcular este parámetro se aplicaron las fórmulas propuestas por:

Kirpich:

$$t_c (\text{min}) = 0,02 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (31)$$

L = longitud del flujo en canal

S = pendiente de la cuenca

$$t_c = 0,02 * (6890m + 270m)^{0,77} * 0,046^{-0,385} = 60,83 \text{ min}$$

Kerby – Kirpich:

$$t_c = t_o + t_{ch} \quad (32)$$

Dónde:

$$t_o = K_o(L_o \cdot N)^{0,467} S_o^{-0,235} \text{ (tiempo de concentración de flujo mantiforme) } (33)$$

$$t_{ch} = K_c L_c^{0,77} S_c^{-0,385} \text{ (tiempo de concentración de flujo en canal) } (34)$$

$t_c$  = tiempo de concentración [min]

$K_o$  = coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 1.44 para unidades del sistema internacional (SI)

$K_c$  = coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 0.0195 para unidades del sistema internacional (SI)

$L_o$  = longitud del flujo superficial (o flujo en láminas).

$L_c$  = longitud del flujo en canal

$S_o$  = pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo mantiforme

$S_c$  = pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo en canal

$N$  = coeficiente de retardo del flujo. Su valor se obtiene de tablas (Tabla 2).

Generalized terrain description	Dimensionless retardance coefficient (N)
Pavement	0.02
Smooth, bare, packed soil	0.10
Poor grass, cultivated row crops, or moderately rough packed surfaces	0.20
Pasture, average grass	0.40
Deciduous forest	0.60
Dense grass, coniferous forest, or deciduous forest with deep litter	0.80

Tabla 2: Coeficiente de fórmula de Kerby-Kirpich

FLUJO LAMINA →  $L_0 = 270 \text{ m (0,27 km)}$

$$\Delta H = 14 \text{ m}$$

$$S_0 = 0,0519 \text{ m/m}$$

$$t_0 = 1,44 * (270 \text{ m} * 0,4)^{0,467} * 0,0519^{-0,235} = 25,70 \text{ min}$$

FLUJO CANAL →  $L_0 = 6890 \text{ m (6,89 km)}$

$$\Delta H = 320 \text{ m}$$

$$S_0 = 0,046 \text{ m/m}$$

$$t_{ch} = 0,0195 * (6890 \text{ m})^{0,467} * 0,046^{-0,385} = 57,58 \text{ min}$$

$$t_c = t_0 + t_{ch} = 25,70 \text{ min} + 57,58 \text{ min} = 83,28 \text{ min} (\cong 1\text{hr}20 \text{ min})$$

- *Tiempo de retardo:* Este parámetro hidrológico resultará necesario para la aplicación del método del hidrograma unitario adimensional explicado anteriormente y se define como el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta hasta que se da el caudal máximo en el hidrograma

El tiempo de retardo fue calculado según la fórmula del SCS (Ven Te Chow et al, 1994):

$$tr = 0.6 tc \quad (35)$$

Kirpich:

$$tr = 0.6 tc = 36.5 \text{ min}$$

Kerby – Kirpich:

$$tr = 0.6 tc = 50.0 \text{ min}$$

▪ *Determinación del número de curva (CN) del método de SCS:*

Al producirse un evento de precipitación (P) parte de la misma no genera escurrimiento, desde el punto de vista del análisis de escorrentía superficial se denomina como "pérdidas" a la fracción de P que no genera escurrimiento y llamamos precipitación efectiva (Pe) a la fracción de que produce escurrimiento superficial. Por lo tanto Pe siempre será menor o igual a la altura de la lámina de precipitación total (P); de manera similar siendo S la retención potencial máxima de la cuenca, la capacidad instantánea de retener agua en la cuenca (Fa) es menor o igual a S.

Por otro lado, existe una cierta cantidad de precipitación, definida como abstracción inicial (Ia) antes del encharcamiento, para la cual no ocurrirá escorrentía

El parámetro CN se utiliza en el método del SCS para calcular las pérdidas iniciales (Ia) y la retención potencial máxima (S).

Al representar en un gráfico la Precipitación Total y la Precipitación Escurrida para muchas cuencas, el SCS encontró que se relacionan mediante curvas como las que se muestran en la Figura 15. Las curvas varían entre un parámetro que es igual a 0 (la lluvia no genera escurrimiento) y 100 (el total de la lluvia escurre), y para estandarizarlas se definió un número adimensional de curva CN.

El valor de CN se encuentra tabulado en base al tipo de suelo, el uso de la tierra y a las pendientes medias de la cuenca, ya que todos estos factores afectan a la capacidad de infiltración de la cuenca.

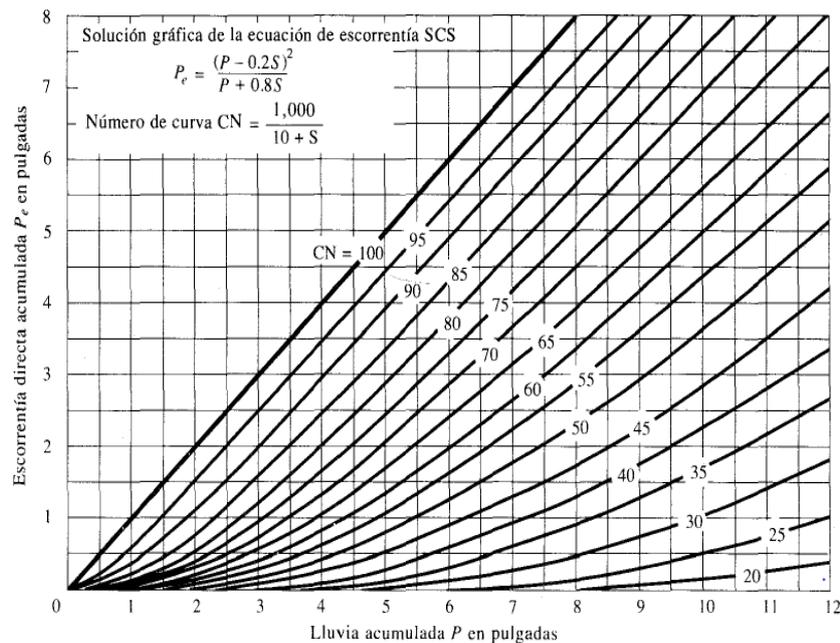


Figura 15: Curvas SCS - CN

### Numero de Curva (CN)

Para definir los valores de curva número (CN) de la cuenca se aplicó la tabla del SCS-CN (Tabla 3) la considerando el uso y tipo de suelo.

- Uso de suelo: Pastizales
- Tipo de Suelo: "B"

**Numero de Curva (CN): 79**

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA	GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena <sup>2</sup>	45 25	66 55	77 70	83 77
Área abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos Industriales /72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial <sup>3</sup> :				
Tamaño promedio del lote				
Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup>				
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc. <sup>5</sup>	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>5</sup>	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Tabla 3: Valores de referencia curva CN

### 3.4. PRECIPITACIONES

La precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales. El promedio de una variable climática, a lo largo de algunos años de observación, se conoce como su valor normal.

Las **lluvias** presentan una gran variación en el espacio y en el tiempo. Algunas magnitudes características son:

- Altura de lámina de lluvia,
- Intensidad de lluvia,
- Frecuencia o recurrencia,
- Distribución temporal.

El **escurrimiento** es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Podemos distinguir tres tipos de escurrimiento:

- Superficial: una vez que la precipitación alcanza la superficie de suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienza a llenar

las depresiones del terreno, y al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie.

El escurrimiento superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca, está relacionado con una tormenta particular y se dice que proviene de la precipitación efectiva, constituye es escurrimiento directo.

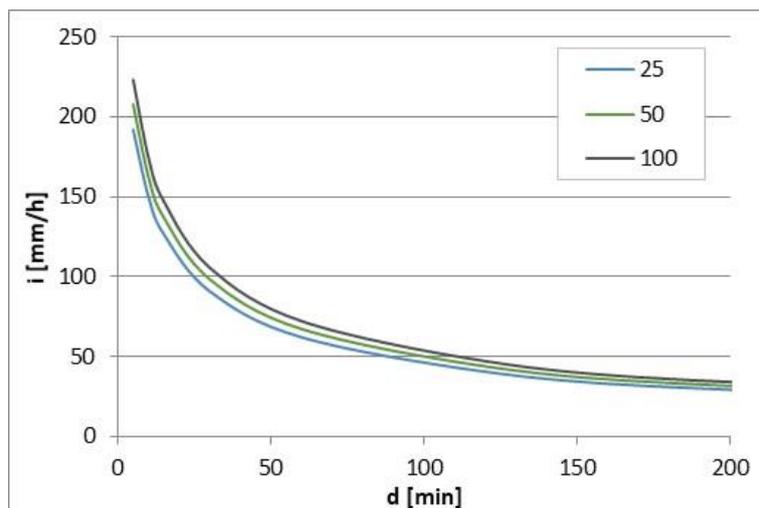
- **Subsuperficial:** una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y, aproximadamente, paralela a él. Puede tener distintas velocidades dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo. Cuando es relativamente rápido se lo trata junto con el superficial y cuando es relativamente lento junto con el subterráneo.
- **Subterráneo:** parte que se infiltra hasta niveles inferiores del freático. Es el que llega de manera más lenta a la salida de la cuenca, difícilmente se lo puede relacionar con una tormenta particular. Debido a que se produce bajo el nivel freático es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias, forma parte del escurrimiento base.

Es común, no contar con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de caudal y, además, estos no se afectan por los cambios en la cuenca. Debido a lo mencionado es que se utiliza la **transformación LLUVIA-CAUDAL**, para poder obtener datos de caudales en la cuenca.

**Curvas IDT:** Las curvas Intensidad – Duración – Recurrencia (IDT) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno. La metodología tradicional usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración.

En este estudio para obtener las curvas IDT en la zona de estudio se aplicó el modelo DIT (Caamaño y García, 1999) partiendo de la estación pluviográfica base de La Suela, se transpuso la relación IDT a la localización del Dique Los Alazanes.

En la Figura 16 se presentan las curvas IDT de la zona en estudio, las cuales se utilizaron para obtener la lluvia de diseño por medio del método de los bloques alternos.



**Figura 16: IDT Los Alazanes**

▪ *Hietogramas de Diseño:*

Partiendo de las curvas IDT se estimaron las láminas de diseño asociadas a las distintas recurrencias (25, 50 y 100 años):

Debido a que el área de la cuenca es menor a 25 km<sup>2</sup> no se aplicó el Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA) y se consideró que la lluvia es uniforme en toda la cuenca.

Para la distribución temporal de la lluvia se aplicó el método de bloques alternos. Este método se utiliza para cuencas intermedias. A partir de una curva IDF, se pueden obtener los hietogramas (distribución temporal de la intensidad o de la profundidad de la precipitación a lo largo de la duración del episodio tormentoso). Para obtenerlo, se requiere poder distribuir a lo largo del tiempo de duración de la precipitación sus distintas intensidades o profundidades.

Una vez determinada la duración de la tormenta, se divide la misma en intervalos ( $\Delta t$ ), se obtiene de la IDF correspondiente valores de intensidad de lluvia para cada intervalo, estos se restan y reacomodan, obteniendo así la lluvia de diseño.

En el presente estudio se analizaron lluvias de 60 y 180 minutos de duración.

➤ Duración 60 minutos

En la Tabla 4 se observan los resultados obtenidos por medio del método de bloques alternos para una lluvia de duración de una hora para tres distintos períodos de retorno (25, 50 y 100 años). En la Figura 17 se muestran estos resultados por medio de un gráfico de barras, comparando los tres períodos.

d (min)	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
10	25	150,0	25,0	25,0	12,0
20		111,0	37,0	12,0	25,0
30		90,0	45,0	8,0	8,0
40		78,5	52,3	7,3	7,3
50		69,7	58,1	5,8	5,8
60		62,2	62,2	4,1	4,1

t	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
10	50	165,10	27,52	27,52	12,82
20		121,00	40,33	12,82	27,52
30		98,90	49,45	9,12	9,12
40		84,70	56,47	7,02	7,02
50		73,30	61,08	4,62	6,26
60		67,34	67,34	6,26	4,62

t	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
10	100	178,75	29,79	29,79	13,54
20		130,00	43,33	13,54	29,79
30		107,20	53,60	10,27	10,27
40		90,80	60,53	6,93	6,93
50		80,00	66,67	6,13	6,13
60		72,31	72,31	5,64	5,64

Tabla 4: Lluvias de diseño mediante bloques alternos duración 1 hr

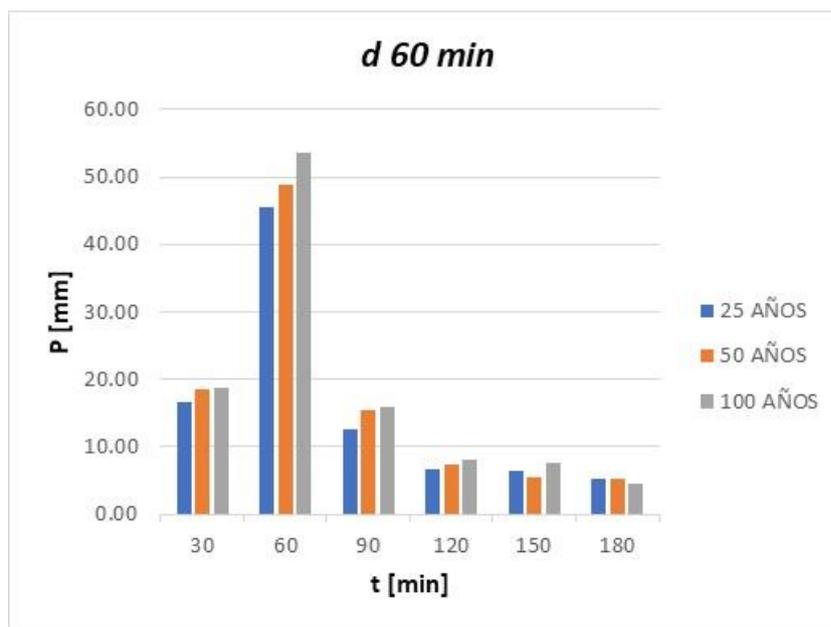


Figura 17: Lluvia de diseño con duración 1 hr

➤ Duración 180 minutos

En la Tabla 5 se muestran las lluvias de diseño obtenidas por medio de la aplicación del método de bloques alternos para una duración de lluvia de 3 horas, en tres distintos períodos 25, 50 y 100 años, lo cual se muestra gráficamente en la Figura 18.

t	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
30	25	91,00	45,50	45,50	16,70
60		62,20	62,20	16,70	45,50
90		49,80	74,70	12,50	12,50
120		40,00	80,00	5,30	6,75
150		34,70	86,75	6,75	6,43
180		31,06	93,18	6,43	5,30

t	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
30	50	97,80	48,90	48,90	18,44
60		67,34	67,34	18,44	48,90
90		55,20	82,80	15,46	15,46
120		45,10	90,20	7,40	7,40
150		38,20	95,50	5,30	5,39
180		33,63	100,89	5,39	5,30

t	Tr	i (mm/h)	Pac (mm)	P (mm)	Pbloq
30	100	106,90	53,45	53,45	18,86
60		72,31	72,31	18,86	53,45
90		58,75	88,13	15,82	15,82
120		47,90	95,80	7,68	8,08
150		40,10	100,25	4,45	7,68
180		36,11	108,33	8,08	4,45

Tabla 5: Lluvias de diseño mediante bloques alternos duración 3 hr

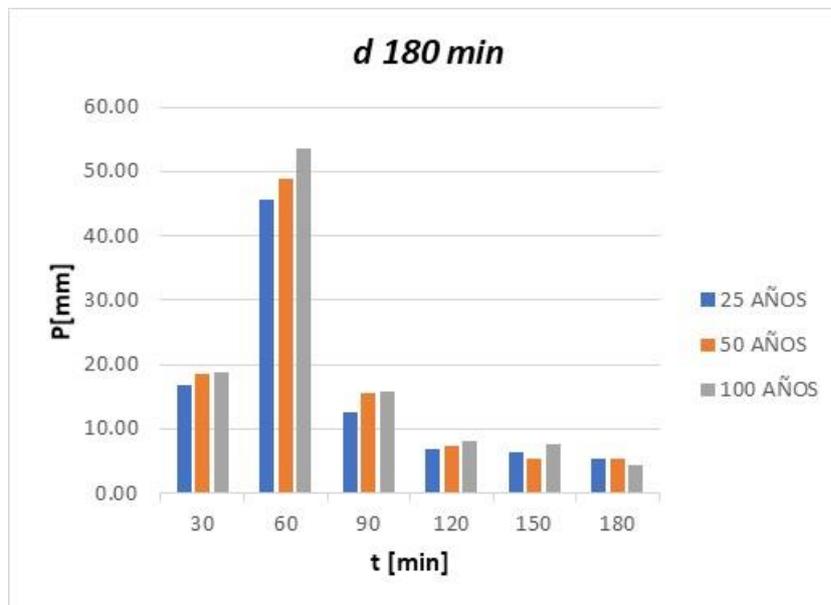


Figura 18: Lluvia de diseño para duración 3 hr

### 3.5. RESULTADOS

Definidos los parámetros hidrológicos de la cuenca y las lluvias de diseño se utilizó el programa de cálculo HEC-HMS para determinar los hidrogramas de diseño asociados.

➤ Duración 60 minutos

En la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se muestran los resultados obtenidos por medio del uso del programa HEC-HMS para una duración de lluvia de 1 hr, con el tiempo de concentración de la fórmula de Kirpich y períodos de recurrencia de 25, 50 y 100 años respectivamente.

➤ Para  $t_c$  Kirpich

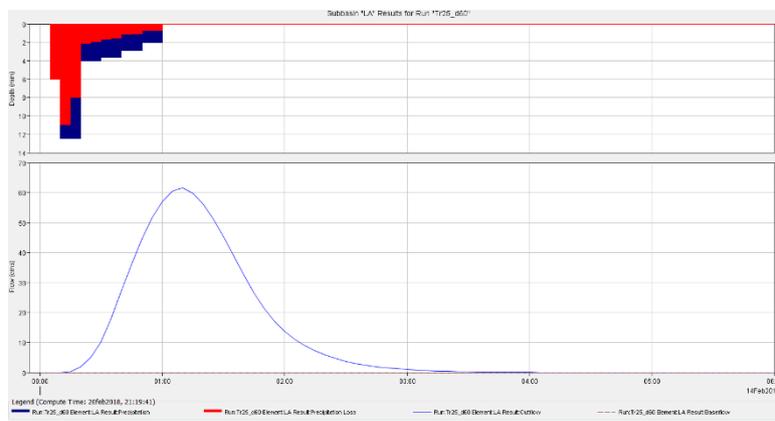


Figura 19: Resultado lluvia de 60 min, TR 25 años y  $t_c$ : 60 min

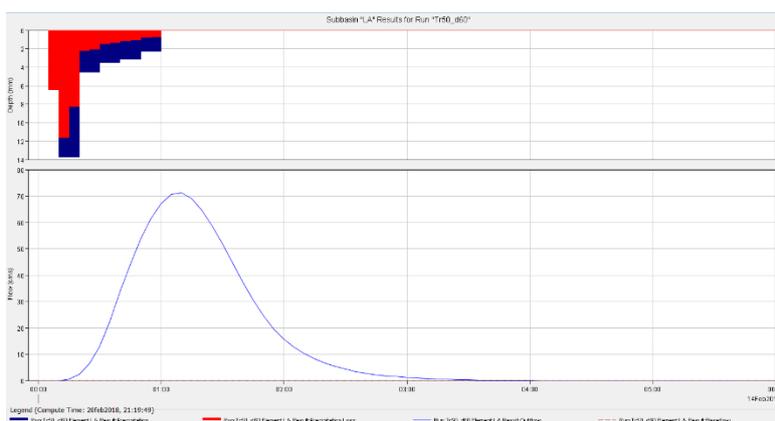


Figura 20: Resultado lluvia de 60 min, TR 50 años y  $t_c$ : 60 min

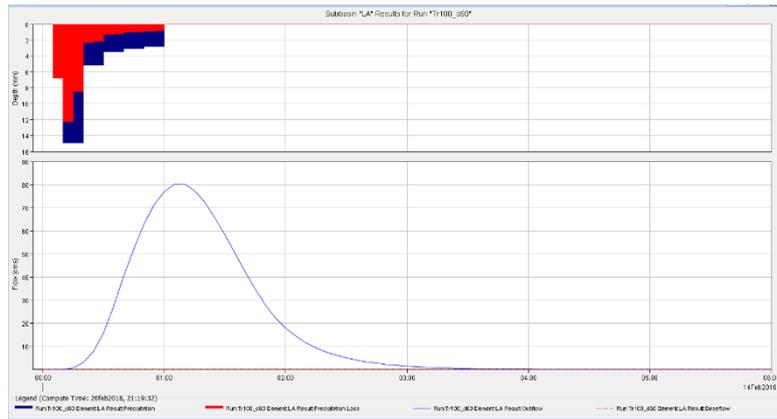


Figura 21: Resultado lluvia de 60 min, TR 100 años y tc: 60 min

➤ Para tc Kerby-Kirpich

En la Figura 22, Figura 23 y Figura 24 se muestran los resultados obtenidos por medio del uso del programa HEC-HMS para una duración de lluvia de 1 hr, con el tiempo de concentración de la fórmula de Kerby-Kirpich y períodos de recurrencia de 25, 50 y 100 años.

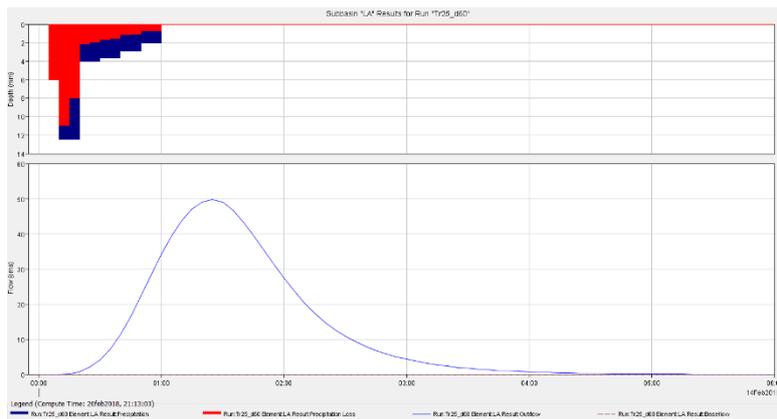


Figura 22: Resultado lluvia de 60 min, TR 25 años y tc: 83 min

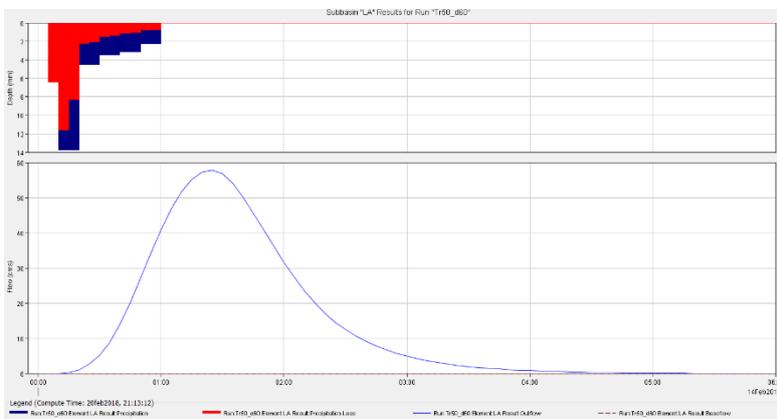


Figura 23: Resultado lluvia de 60 min, TR 50 años y tc: 83 min

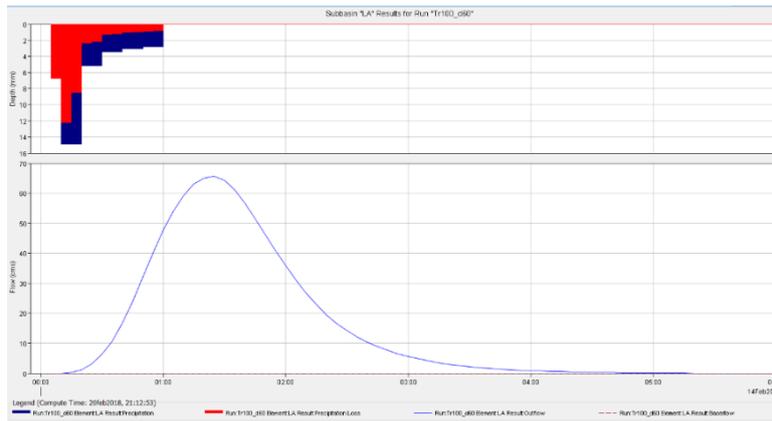


Figura 24: Resultado lluvia de 60 min, TR 100 años y tc: 83 min

- Duración 180 minutos
- Para tc Kirpich

En la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se presentan los resultados obtenidos en HEC-HMS luego de procesar la lluvia de diseño, para una tormenta de duración de 3 hr, según el tiempo de concentración de la fórmula de Kirpich para períodos de recurrencia de 25, 50 y 100 años.

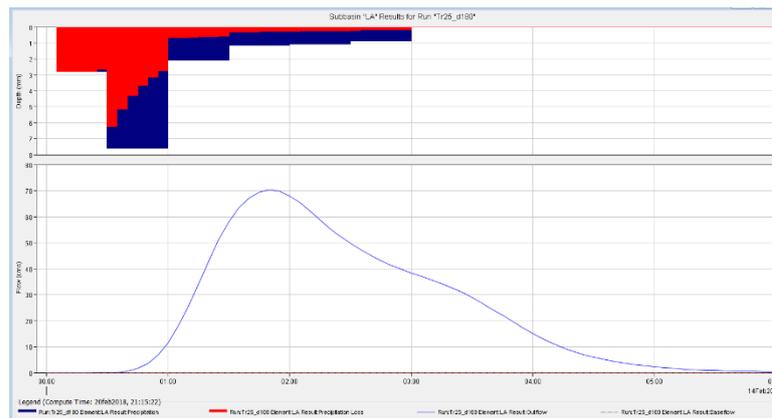


Figura 26: Resultado lluvia de 180 min, TR 25 años y tc: 60 min

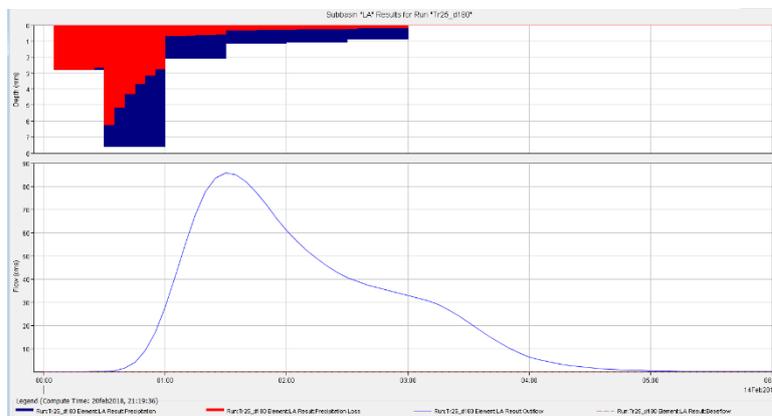


Figura 25: Resultado lluvia de 180 min, TR 50 años y tc: 60 min

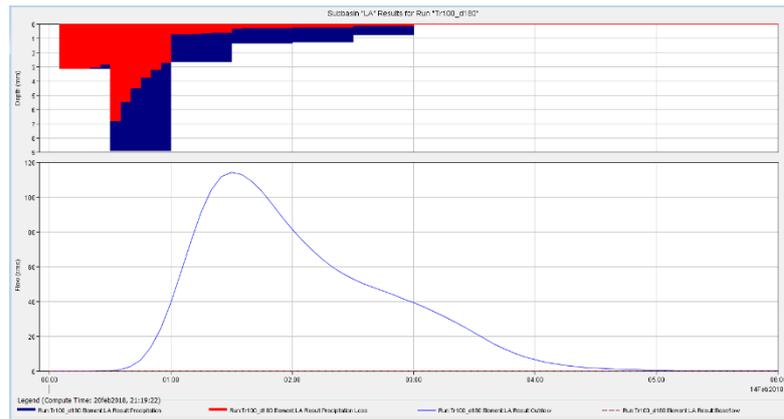


Figura 27: Resultado lluvia de 180 min, TR 100 años y tc: 60 min

➤ **Para tc Kerby-Kirpich**

En la Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se observan los resultados obtenidos en HEC-HMS a partir de la lluvia de diseño obtenida por bloques alternos para una tormenta de 3 horas, con el tiempo de concentración de Kerby-Kirpich y períodos de recurrencia de 25, 50 y 100 años.

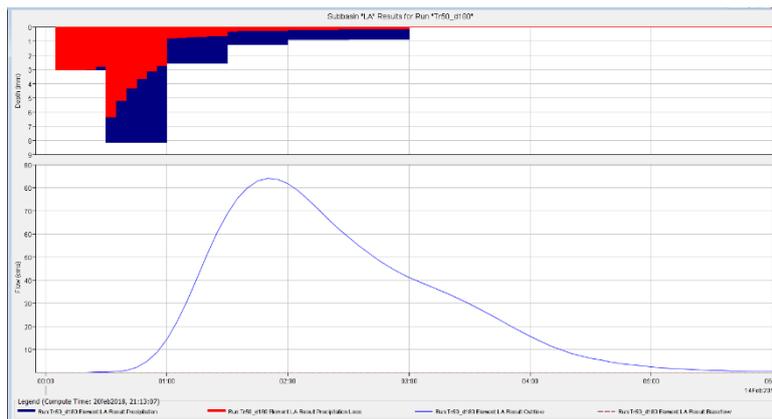


Figura 28: Resultado lluvia de 180 min, TR 25 años y tc: 83 min

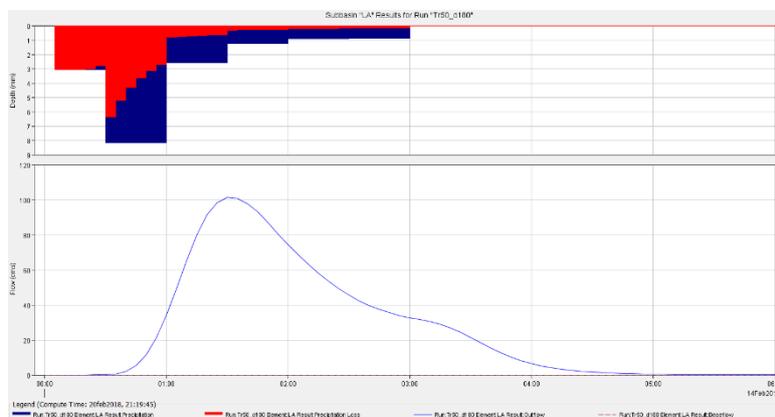


Figura 29: Resultado lluvia de 180 min, TR 50 años y tc: 83 min

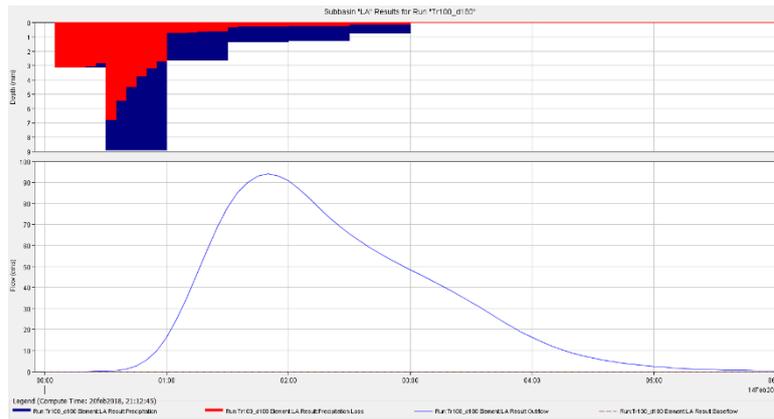


Figura 30: Resultado lluvia de 180 min, TR 100 años y tc: 83 min

En la Tabla 6 se muestra un resumen de los caudales picos obtenidos en cada una de las modelaciones realizadas. Se observa que para tiempos de concentración menores (el obtenido con la fórmula de Kirpich) los caudales picos son mayores y que la duración de lluvia de 180 min mostró resultados mayores.

Para asociar los caudales a recurrencias se consideró la situación más desfavorable es decir el tiempo de concentración obtenido con la fórmula que Kirpich y una duración de la lluvia de 180 min.

Duración de lluvia (min)	Recurrencia Tr (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	
		con tc: Kirpich	con tc: Kerby-Kirpich
60	25	60	50
	50	70	60
	100	80	65
180	25	<b>85</b>	70
	50	<b>100</b>	85
	100	<b>110</b>	90

Tabla 6: Resumen caudales resultantes de HEC-HMS

## 4. MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se muestran los materiales y métodos que se emplearon en la Práctica Supervisada a fin de realizar los estudios experimentales y las formulaciones teóricas utilizadas para evaluar el comportamiento del vertedero y el flujo de aproximación.

Presentaremos el instrumental con el que cuenta el Laboratorio de Hidráulica de la UNC utilizados para el desarrollo del estudio, así como también se explicará el proceso de construcción del modelo.

Describiremos las metodologías e instrumental utilizado para caracterizar el flujo (ADV, PIV, FlowTracker, sensores de presión, liras piezométricas), para luego desarrollar los ensayos que se llevaron a cabo.

### 4.1. INSTRUMENTAL DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNC

El sector en el que se emplaza el modelo Los Alazanes se corresponde con el del modelo Suco, construido en el año 2006 en el interior del edificio del Laboratorio de Hidráulica. Con dimensiones entre paredes laterales de 3,00 m y 9,60 m, cuenta con un circuito compuesto por un equipo de bombeo, canales de aforo, cámara de ingreso, cuenco de modelación y retorno a la cisterna, descrito a continuación:

**Canal de aforo:** Consiste en un canal rectangular que cuenta con un vertedero triangular de pared delgada (Figura 31), de 90° calibrado el cual permite medir caudales conociendo la altura limnimétrica sobre la cresta del vertedero.



**Figura 31: Vertedero triangular calibrado**

**Equipo de Bombeo:** Se cuenta con dos bombas sumergibles tipo Flyght, cada una de ellas (Figura 32) es capaz de desarrollar un caudal máximo de 70 lts/seg. Cada bomba cuenta con una conducción de alimentación y una conducción de retorno a cisterna, ambas de hierro forjado. Sobre tales conducciones se hallan dispuestas válvulas esclusas de operación manual que permiten regular los caudales que viajan hacia el modelo que se quiere ensayar.



Figura 32: Equipo de bombeo

A continuación, en las Figura 33 y Figura 34 las curvas H-Q obtenidas para llevar a cabo la calibración del mismo.

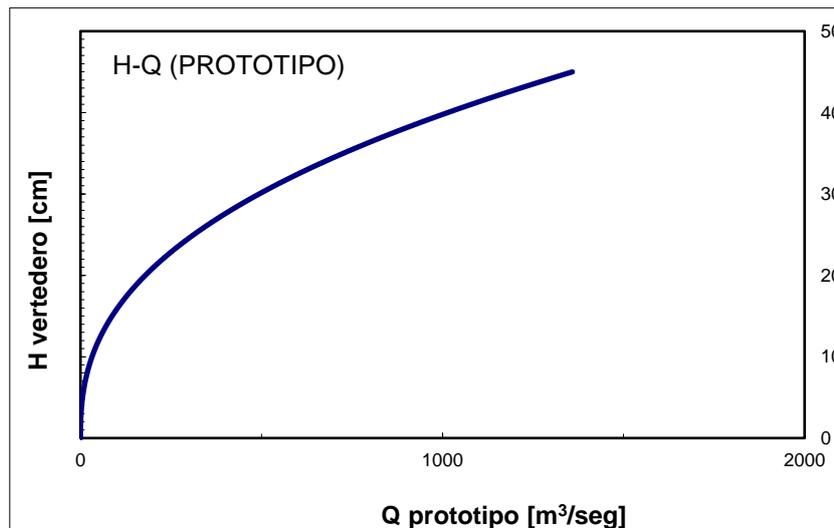


Figura 33: Curva H-Q prototipo

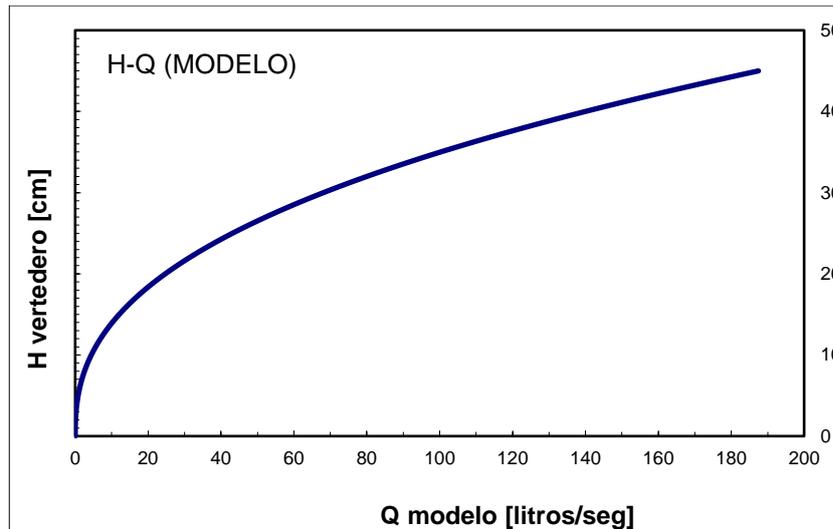


Figura 34: Curva H-Q modelo

En la Tabla 7, se observa cómo se obtiene el caudal a partir de la lectura del limnómetro, por medio de un Cd que se calcula en función de los datos medidos en el modelo:

$$Q = \frac{8}{15} * (2 * 9,81)^{0,5} * Cd * h^{\frac{5}{2}} \quad (36)$$

	H [cm]	Cd	Lectura [cm]	Qmod [l/s]	qmod [l/s.m]
ENSAYO 1	15,39	0,5859	28,9	12,86	25,72
ENSAYO 2	14,12	0,5867	27,63	10,38	20,77
ENSAYO 3	12,84	0,5877	26,35	8,20	16,40
ENSAYO 4	12,39	0,5882	25,9	7,51	15,02
ENSAYO 5	11,78	0,5889	25,29	6,63	13,25
ENSAYO 6	10,81	0,5902	24,32	5,36	10,71
ENSAYO 7	6,59	0,6009	20,1	1,58	3,17
ENSAYO 8	9,16	0,5933	22,67	3,56	7,12
ENSAYO 9	12	0,5886	25,51	6,94	13,87
ENSAYO 10	14,3	0,5865	27,81	10,72	21,43
ENSAYO 11	15,69	0,5858	29,2	13,49	26,99
ENSAYO 13	11,64	0,5890	25,15	6,43	12,86
ENSAYO 14	15,21	0,5860	28,72	12,49	24,98
ENSAYO 15	14,1	0,5867	27,61	10,35	20,69
ENSAYO 16	14,66	0,5863	28,17	11,40	22,80
ENSAYO 17	11,32	0,5895	24,83	6,00	12,01
ENSAYO 18	12,59	0,5880	26,1	7,81	15,62

Tabla 7: Caudales a partir de la Hlimn por medio del uso del vertedero triangular calibrado

**Cisterna:** La cisterna del Laboratorio de Hidráulica consiste en un recinto subterráneo de sección rectangular de 1.30 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad, y con un desarrollo rectangular en planta de unos 76 metros lineales.

### Dispositivos de medición fijos:

- *Limnímetros*: Permiten conocer los diferentes niveles de agua. Existe un limnómetro dispuesto sobre el canal de aforo, tres limnímetros en la zona de los modelos, y tres más en la zona de aguas abajo. Constan de un tubo circular de vidrio interconectado a la zona que se desea medir, sobre el que se dispone el limnómetro que es del tipo a cremallera, con precisión de 0.1 mm. En la Figura 35 se observa el limnómetro utilizado.



**Figura 35: Limnómetro**

- *Tableros multipiezométricos (Liras)*: Corresponden a las distintas partes de un modelo como vertederos, canales de restitución, rápidas, saltos esquí, etc. Permiten conocer las presiones estáticas de agua. Cada toma piezométrica es un pequeño tubo de acrílico interconectado a la zona que se mide, apoyado sobre una escala graduada en milímetros.

## 4.2. MODELO FISICO 3D – LOS ALAZANES

Parte del equipo de trabajo del laboratorio de hidráulica y personal de la secretaria de recursos hídricos de la provincia de Córdoba realizaron dos visitas a la zona de estudio con el objetivo de reconocer la zona de emplazamiento de las obras, las obras hidráulicas existentes y las características del cauce. En estas visitas se relevó la topografía del cauce en la zona de estudio con estación total y se tomaron fotografías aéreas con Dron.

A partir del relevamiento topográfico realizaron un modelo digital de elevación de la zona a modelar y se obtuvieron las curvas de nivel.

El modelo físico se realizó, como ya se mencionó, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

En función de los objetivos del estudio y de las instalaciones disponibles en el laboratorio, se definieron las características del modelo físico:

### Objetivos del Modelo Físico:

- 1 – Optimizar muro de regulación de aguas abajo (azud),
- 2 – Cuantificar presiones y macro-turbulencia en la descarga del vertedero.

### Características del Modelo:

- Modelo físico a fondo fijo,
- Similitud de Froude
- Escala de longitudes no distorsionada  $E_L = 1:35$
- Área de modelación  $8000\text{m}^2$  (en prototipo)

Para lograr una correcta representación de las características topográficas en la zona del modelo, se confeccionó un modelo digital de terreno desarrollado en la etapa anterior y completado para la realización de este modelo físico. Sobre esta información se establecen distintas secciones representativas que permiten una correcta reproducción de la topografía de la zona, de tal manera que entre dos secciones consecutivas se pueda suponer una superficie lineal, evitando la pérdida de información topográfica. Identificadas cada una de éstas, se procedió a realizar los planos correspondientes con la escala previamente estipuladas, que una vez impreso es pegado sobre un tablero duro de fibras y posteriormente son cortados. Se generan de esta manera los perfiles -también llamados "costillas" (ver Figura 36)-, las cuales colocadas en sus correctas posiciones planialtimétricas dentro del modelo físico, permiten reglar una superficie representativa de la topografía del sector, la cual es fija, siendo el único requerimiento la representación de los factores hidráulicos de la obra y su entorno.



**Figura 36: Nivelación costillas**

La colocación en planta se llevó a cabo mediante el uso de una grilla milimetrada referenciada a partir de un punto fijo y ubicada por sobre todo el modelo, y desde la cual es posible con la plomada marcar los puntos necesarios para cada elemento necesario a replantear.

Por su parte, la altimetría se logra con ayuda de mira y nivel, a través de la regulación al milímetro de tornillos dispuestos en los puntos determinados en el paso anterior.

Culminada la planialtimetría, posicionadas y fijadas con una base de mezcla cementicia las costillas sobre cada tornillo, replantearon los puntos donde irán las tomas de presión y se materializan las mismas de la siguiente manera:

- Tomas de presión estática: miden la presión media, por lo que son usadas para determinar el tirante en la sección. Se usarán un conjunto de 18 tomas de este tipo, de las cuales 16 están distribuidas en dos filas sobre el vertedero, 1 aguas arriba y 1 aguas abajo del mismo, antes de la compuerta. La conducción entre estos puntos y el punto de observación se hace mediante mangueras de cristal de 6 mm de diámetro interno;
- Tomas de presión dinámica: miden tanto la presión media como las fluctuaciones generadas por la turbulencia. Se usarán un conjunto de 9 tomas de este tipo, todas ellas ubicadas inmediatamente aguas abajo del vertedero. A diferencia del anterior grupo, la conducción se hace mediante caños de cobre de 6,5 de diámetro interno, debido a los errores en la medición de fluctuaciones ocasionadas por la deformación del conducto al pasar la onda de presión, por lo que se debería cambiar o bien el espesor  $\epsilon$  del mismo o el módulo E del material.

El vertedero propiamente dicho se fabricó de *polietileno de alto impacto*, y cuenta con los 16 orificios necesarios para la colocación de las tomas de presión. Cada una de ellas cuenta con un "canuto" de lapicera –que tiene el diámetro necesario para este tipo de mediciones- de 1,5 cm de largo, cuya punta se introduce 0,15 cm en la lámina de polietileno por debajo del vertedero –que cuenta con 0,3 cm de espesor-. A su vez, este elemento se encuentra dentro de un caño de bronce de 6 cm de largo -que ya está unido a la manguera de cristal correspondiente- y se les aplica un sellador.

Terminado este trabajo, se lleva el vertedero al lugar del modelo y se lo posiciona en su lugar, verificando las coordenadas de este con la ayuda de la grilla –en planta- y la mira y nivel –en altura-. Por último, se procede a fijarlo con mezcla y a dar las terminaciones al modelo.

En las Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40 se observan distintas fotos del proceso de construcción del modelo físico LA.



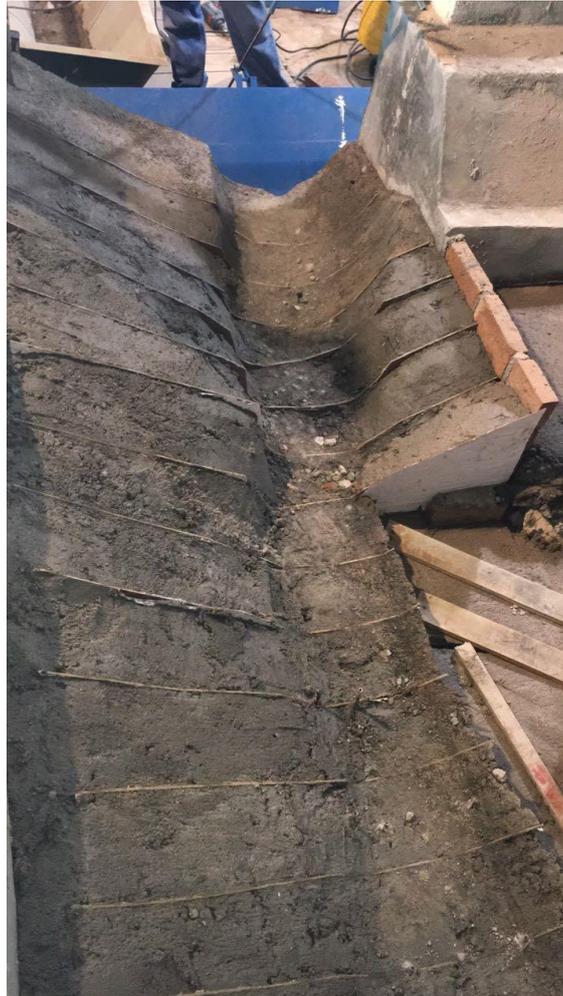
**Figura 37: Construcción**



**Figura 38: Vista desde aguas arriba y aguas abajo**



**Figura 39: Vertedero**



**Figura 40: Relleno costillas**

### 4.3. INSTRUMENTAL Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

#### 4.3.1. PIV (Velocimetría por imágenes de partículas)

La velocimetría de partículas es una de las técnicas más recientes que permite determinar el campo de velocidad del flujo. Es una técnica de medición que no perturba el flujo, permitiendo obtener el campo de velocidades del flujo de manera instantánea y con alta resolución espacial por medio de partículas trazadoras sembradas en el flujo.

El desarrollo de esta herramienta en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos logrando un avance notable en el campo de la mecánica de los fluidos e hidráulica. Los resultados obtenidos son similares a la dinámica de fluidos computacional en simulaciones de remolino y mapas en tiempo real de velocidad, y tiene un amplio campo de aplicación en el estudio de transporte de sedimentos en suspensión. Ambas técnicas son una herramienta fundamental para los investigadores de la dinámica de fluidos.

El método de velocimetría de partículas consiste en iluminar el plano en el cual se desea medir la velocidad, e introducir un campo de partículas de igual densidad que el fluido para que la luz se refleje sobre ellas y permita materializarlas.

Una instalación típica para aplicar el método de velocimetría de partículas (tanto PIV como PTV) en tres dimensiones consiste en 2 o más cámaras digitales instaladas en posición adecuada de manera que realicen una grabación sincronizada de los trazadores sembrados en el flujo y que pueden tomar la mayor cantidad de imágenes consecutivas posibles. Aunque es suficiente contar con dos cámaras en la configuración estereoscópica para determinar las 3 coordenadas de posicionamiento de la partícula en el espacio. Observar una muestra desde dos direcciones perpendiculares presenta múltiples ventajas porque simplifica los cálculos 3D de las posiciones de las partículas, y permite muestrear un volumen en diversas direcciones. Desafortunadamente, la geometría del flujo algunas veces no admite realizar tal instalación.

En otros sistemas simples (una sola cámara), la tercera componente de la velocidad es "invisible" debido a la geometría de la proyección de imagen. Este sistema en dos dimensiones es el utilizado para medir velocidades en un plano.

Si se quieren medir velocidades en un plano que abarque toda la columna de agua, las partículas trazadoras sembradas deben tener una densidad similar a la del agua para lograr una distribución uniforme en profundidad.

Se quieren medir velocidades superficiales, las partículas sembradas deben tener una densidad menor a la del agua así se pueden distribuir superficialmente, pero suficientemente cercana para que escurran junto con el flujo (Figura 41).

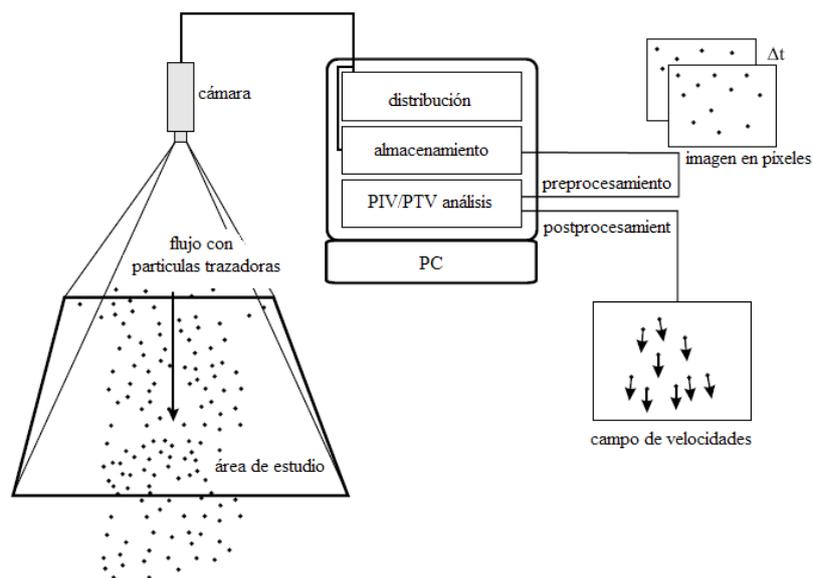


Figura 41: Esquema sistema PIV

Una suposición básica del método es que las partículas son capaces de seguir al flujo, lo cual es real dependiendo de las características de las partículas empleadas. Para comprender el efecto de las partículas sobre las mediciones se debe asumir que cada partícula es un filtro. El flujo está compuesto por una serie de vórtices de distintos tamaños, los cuales contienen distintos niveles de energía. Los vórtices de grandes dimensiones (alta energía) están asociados a frecuencias

bajas, al contrario de los vórtices pequeños los cuales están asociados a frecuencias altas (baja energía). La partícula es un filtro que responde a un cierto nivel mínimo de energía, por lo tanto, la dinámica de todas las frecuencias mayores, a la frecuencia asociada a ese nivel de energía, no pueden ser capturadas por medio de este método de medición.

En general la dinámica de todas las frecuencias bajas (grandes vórtices) puede ser capturada sin problemas, y para obtener información de los pequeños vórtices se deben usar partículas de diámetros muy pequeños, lo cual trae algunas restricciones respecto al tamaño del área de flujo que se puede muestrear (Brevis et al, 2006). Lo anterior se debe principalmente a que para registrar con cierta precisión la posición de la partícula, esta debe tener un diámetro mínimo de entre 3 a 4 píxeles en la imagen.

Una vez sembradas las partículas trazadoras en el flujo, se procede a la grabación de imágenes secuenciales mediante la utilización de una cámara fotográfica o cámaras de vídeo a una cierta cantidad de cuadros por segundo (cps). Los lentes de la cámara toman las imágenes en la matriz del CCD (Charge-Coupled Device) de una cámara digital. El CCD es un dispositivo de cargas eléctricas interconectadas que puede capturar cada pulso en tomas de imágenes separadas. Luego, las imágenes son procesadas mediante un programa específico, a los fines de digitalizarlas e identificar en cada una de ellas la posición de las partículas que luego se compararán en imágenes sucesivas.

Para la identificación de las partículas normalmente se emplean 2 metodologías: el nivel umbral, o la máscara gaussiana.

Mediante dos imágenes tomadas con un intervalo  $\Delta t$  entre ellas, se puede obtener el campo de flujo en un plano, determinando para las partículas la velocidad  $V$  a partir de la distancia  $\Delta x$  que se desplazaron. Una medida exacta del desplazamiento y por lo tanto de la velocidad se alcanza con una interpolación a nivel de sub-píxel. (Tarrab, 2008).

La correspondencia entre las partículas de dos imágenes sucesivas se obtiene por medio del cálculo del coeficiente de correlación. Este valor se obtiene entre una distribución de partículas de referencia (en una región llamada ventana de interrogación) en la primera imagen, y la posible candidata en la segunda imagen que se ha corrido de manera que los centroides de los posibles pares coincidan.

En resumen, el programa de seguimiento de partículas proporciona un vector instantáneo de velocidad bidimensional, para las partículas desde una imagen inicial a otra de un tiempo posterior.

La técnica PIV utiliza un marco de referencia Euleriano, y permite la determinación del campo de velocidades basándose en la determinación del desplazamiento del promedio de un grupo de partículas, con lo cual la velocidad se obtiene en una malla regular. Una descripción del perfeccionamiento de esta técnica se detalla en Rafael et al (1998) y en Adrian (1991).

#### 4.3.2. ADV (Velocímetro Acústico Doppler)

Es un instrumento de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad, en una variedad de condiciones de flujo como ser instalaciones de laboratorios, ríos, estuarios, y océanos. El instrumento ADV utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento.

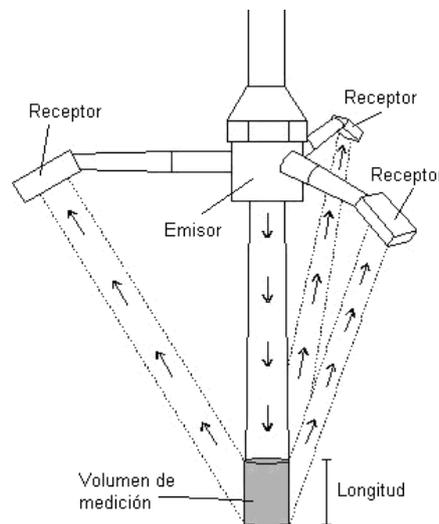
El instrumento disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la U.N.C es el MicroADV fabricado por YSI/Sontek Inc. y es el utilizado en este trabajo.

El Micro ADV se compone de tres elementos básicos:

- La sonda (donde se encuentran los emisores y receptores de la señal acústica),
- El módulo de acondicionamiento de la señal,
- El módulo de procesamiento de la señal.

La sonda va unida al módulo de acondicionamiento, que reduce el efecto del ruido en la señal. Este módulo está contenido en una cubierta sumergible. La sonda y el módulo de acondicionamiento de la señal van conectados al módulo de procesamiento por medio de un cable blindado de hasta 10 m de largo.

La localización precisa del volumen de medición queda determinada por la geometría de la sonda, y normalmente esta distancia es aproximadamente entre 5 cm y 10 cm desde el extremo de la misma dependiendo del modelo de ADV. Para el MicroADV utilizado esta distancia es de 5 cm.

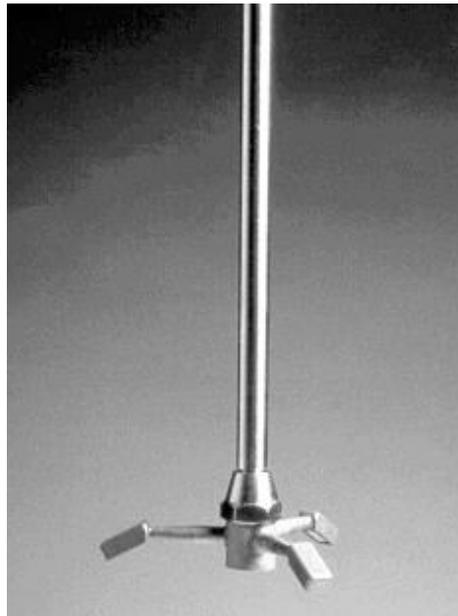


**Figura 42: Volumen de medición**

El tamaño del volumen de medición de ADV es determinado por la configuración del muestreo dada por el usuario (Figura 42). El volumen de medición estándar para el MicroADV es un cilindro de agua con un diámetro de 4.5 milímetros y una altura de 5.6 milímetros.

Su forma se define por la circunferencia que forma el emisor de ultrasonidos y el eje perpendicular a éste. Con estos dos elementos se genera un cono asociado a la dispersión de las ondas emitidas. Por el hecho de tratarse de un emisor de 10 MHz, son ondas direccionales que presentan poca dispersión. La manera de materializar el volumen de medición es mediante la modificación del pulso y la modificación de la ventana de la recepción de ecos.

La configuración disponible en el Laboratorio de la U.N.C. permite sólo el uso de la orientación hacia abajo, como se observa en la Figura 43, por lo que no es posible realizar mediciones de velocidades en cercanías a la superficie.



**Figura 43: Orientación hacia abajo 3D**

Un Velocímetro Acústico Doppler mide velocidades tridimensionales del flujo, utilizando el principio de corrimiento de frecuencia de Doppler. Si una fuente de sonido se está moviendo con respecto al receptor, la frecuencia del sonido en el receptor cambia con respecto a la frecuencia del emisor.

El emisor de sonido genera una señal acústica en una frecuencia conocida que se propaga a través del agua a lo largo de su eje, y es reflejada por partículas presentes en el agua (sedimentos, organismos pequeños, burbujas), que se asume se desplazan a la velocidad del agua y deben tener inercia muy pequeña. Una cierta porción de la energía reflejada vuelve a lo largo de los ejes de los receptores, la señal es registrada y procesada por los distintos componentes del MicroADV para determinar el cambio de frecuencia debido al efecto Doppler.

Cada par emisor/receptor define la proyección de la velocidad del agua sobre su eje biestático. Los receptores están alineados de modo tal que se intersecan formando un volumen de medición común. La velocidad medida por cada receptor se refiere como la velocidad biestática, y es la proyección del vector de la velocidad sobre el eje biestático. Las velocidades son convertidas por el módulo de procesamiento en componentes de velocidades referidas a los ejes cartesianos XYZ utilizando la geometría de la sonda. Las velocidades en XYZ están referidas en función a la orientación de la sonda del MicroADV. El Velocímetro Acústico Doppler utiliza un esquema de par de pulsos duales con diversas tasas de repetición del pulso,  $t_1$  y  $t_2$ , separado por un tiempo  $t_D$  (McLelland y Nicholas 2000). El par de pulsos más largo se utiliza para las estimaciones más exactas de la velocidad, mientras que el pulso más corto se utiliza para la resolución de la ambigüedad, asumiendo que la velocidad real va más allá del límite que puede ser resuelto por el retraso de tiempo más largo. Estas tasas de repetición del pulso pueden ser ajustadas cambiando el rango de velocidad de medición.

Cada velocidad radial  $v_i$ , es el resultado del eco acústico reflejado por el sonido disperso de las partículas en el agua durante un tiempo total de  $T/3$ , y por lo tanto, éste es un valor medio de la velocidad verdadera del flujo en este intervalo de tiempo. También, cada una de las componentes cartesianas finales de la velocidad es un promedio de las tres componentes radiales de la velocidad (el producto de la matriz de transformación y de la velocidad radial).

La implicación directa de estas características es que la velocidad cartesiana del flujo representa un valor promedio de la velocidad real del flujo, a lo largo de un intervalo T.

*El MicroADV es un instrumento de fácil instalación y uso, ello permite que el usuario pueda empezar a trabajar con él sin estar familiarizado completamente con el funcionamiento del aparato. Es importante la experiencia del usuario para adoptar la configuración óptima de registro. El Micro ADV requiere ciertos parámetros de configuración, que se dividen en dos grupos:*

*1) Parámetros de configuración que dependen de las condiciones del fluido.*

*Son los parámetros que se obtienen mediante mediciones directas sobre el fluido como la temperatura y la concentración de sales, ambos empleados para determinar la velocidad del sonido en el medio.*

*2) Parámetros de configuración que dependen de las condiciones del flujo.*

*Estos parámetros se definen a partir de las características del flujo. Entre ellos encontramos el tamaño del volumen de control, el rango de velocidades y la frecuencia de muestreo.*

### Guía Práctica de Uso

*En esta sección se sintetizan los principales requisitos que se deben satisfacer para registrar y procesar señales de velocidad de flujo que sean representativas de los procesos turbulentos en el flujo. Esta síntesis da forma a una guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV.*

*A continuación, se presenta esta guía:*

- a) Definir los objetivos del estudio (caracterizar valores medios, Energía cinética turbulenta, Esfuerzos de Reynolds, escalas de longitud de las estructuras turbulentas, etc.).*
- b) Definir las zonas de flujo que se desea caracterizar (zona cercana al fondo, a la superficie libre, etc.)*
- c) Verificar el adecuado posicionamiento del instrumento (orientación, verticalidad y robustez para evitar vibraciones).*
- d) Determinar los parámetros físicos del fluido a medir (temperatura, salinidad) necesarios para determinar la velocidad del sonido en el medio. Se debe evaluar la variación de estos parámetros durante el proceso de medición.*
- e) Estimar a priori los parámetros  $U_c$  y  $L$  en cada zona de flujo a analizar. Estimar la escala de tiempo  $T$  del proceso turbulento analizado ( $T = L/U_c$ ).*
- f) Determinar longitud de registro  $T_m$  para cada zona de flujo de interés usando las ecuaciones correspondientes dependiendo del objetivo del estudio definido en el punto 1. Para estudios que incluyan la definición de distintos parámetros, se debe adoptar la mayor longitud de registro estimada.*

- g) *Determinar la frecuencia de registro óptima en cada región de flujo a analizar para caracterizar los parámetros de la turbulencia (satisfacer  $F = fR L / U_c > 20$ ).*
- h) *Definir la configuración de registro óptima (Rango de velocidades y tamaño del volumen de medición) del ADV para cada región de flujo y la frecuencia de registro seleccionada. Se requiere en este punto realizar un análisis de sensibilidad en cada región maximizando SNR y correlación. En los casos que sea necesario (y que sea posible) se evaluará la alternativa de agregar partículas trazadoras en suspensión al flujo.*
- i) *Procesamiento de la señal para remover valores anómalos y reemplazarlos en caso de que el objeto del estudio requiera analizar la correlación temporal de la señal.*
- j) *Procesamiento de la señal para definir los niveles de ruido Doppler en la señal.*
- k) *Calcular los parámetros de la turbulencia requeridos en el estudio y/o proyecto corrigiendo los efectos del ruido Doppler en base a los niveles de ruido Doppler detectados en el punto anterior (García et al 2006a).*
- l) *Determinar los intervalos de confianza de cada uno de los parámetros de la turbulencia estimados usando la metodología detallada en García et al (2006b).*

#### 4.3.3. FLOWTRACKER

El FlowTracker (Figura 44) mide velocidades de un rango tan bajo como 0.001 m/s (0.003 ft/s) y tan alto como 4.5 m/s (15 ft/s). Combinado con una vara vadeadora, puede usarse para medir el caudal total de una sección transversal de un río.

Utiliza la tecnología exclusiva ADV de SonTek para medir velocidades en 2-D y 3-D en un pequeño punto de medición situado a 10 cm del transmisor acústico. Esto permite medidas de corrientes naturales libres de cualquier alteración causada por el instrumental. El FlowTracker no tiene partes móviles.

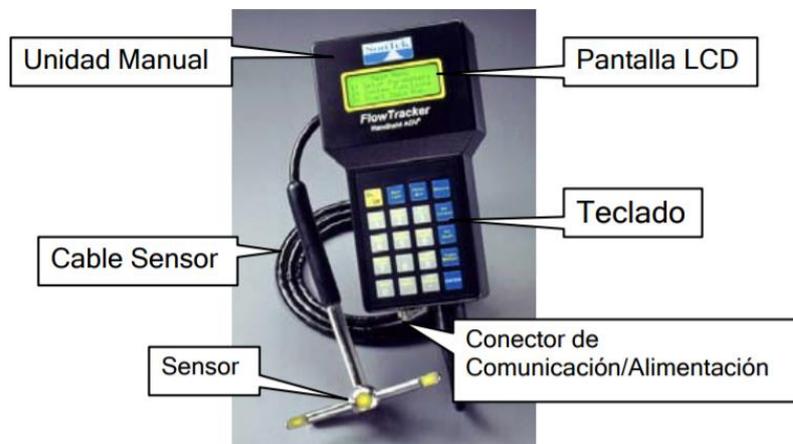


Figura 44: Partes FlowTracker

Puede utilizarse en: corrientes naturales, presas y canales, canales abiertos, irrigación, tratamiento de aguas. La medición de caudal requiere vadear transversalmente la corriente/río mientras se toman las medidas de calado y velocidad del agua en diferentes posiciones. Cuando se combinan estos datos, se puede calcular el caudal total.

Se elige un lugar con un fondo en condiciones razonables que pueda ser fácilmente vadeable (típicamente de no más de 1 m de profundidad). Se empieza en un margen y se introduce la posición del margen inicial y el calado del agua. Se divide la sección transversal del río en el número de estaciones apropiadas para su anchura. En cada estación, el operador introduce la posición de la estación y el calado del agua y mide la velocidad en uno o varios calados.

Durante toda la medición, el eje X del sensor debe mantenerse perpendicular a la cuerda graduada. El sensor debe mantenerse lejos de obstáculos sumergidos que puedan perturbar la corriente. Los datos de velocidad son grabados una vez por segundo durante todo el tiempo de muestreo, y entonces se calcula la velocidad promedio. Los datos de control de calidad también se revisan y muestran; será alertado y hay algún dato imprevisto. El cálculo de caudal para una estación se basa en el calado, anchura de estación y velocidad promedio. El caudal total es la suma de todos los valores de caudal de las estaciones y márgenes.

#### 4.3.4. LIRAS PIEZOMETRICAS

Permiten conocer las presiones estáticas de agua. Cada toma piezométrica es un pequeño tubo de acrílico interconectado a la zona que se mide, apoyado sobre una escala graduada en milímetros. En la Figura 45 se observan las lecturas de las liras.



**Figura 45: Lectura liras**

#### 4.3.5. SENSORES DE PRESION

Permite obtener las presiones fluctuantes aguas abajo del vertedero. Se realizó con la ayuda del software PASCO Capstone, a través de mediciones de presiones absolutas en 9 tomas, estas mediciones se realizaron con un sensor PASCO Wireless Pressure PS-3203 cuyo rango de trabajo

oscila entre los 0 y 400 KPa con una frecuencia de muestreo de hasta 1000 Kz. En la Figura 46 se observa la ubicación de las distintas tomas aguas abajo del vertedero. En la Figura 47 se observa el sensor PASCO.



Figura 46: Ubicación tomas

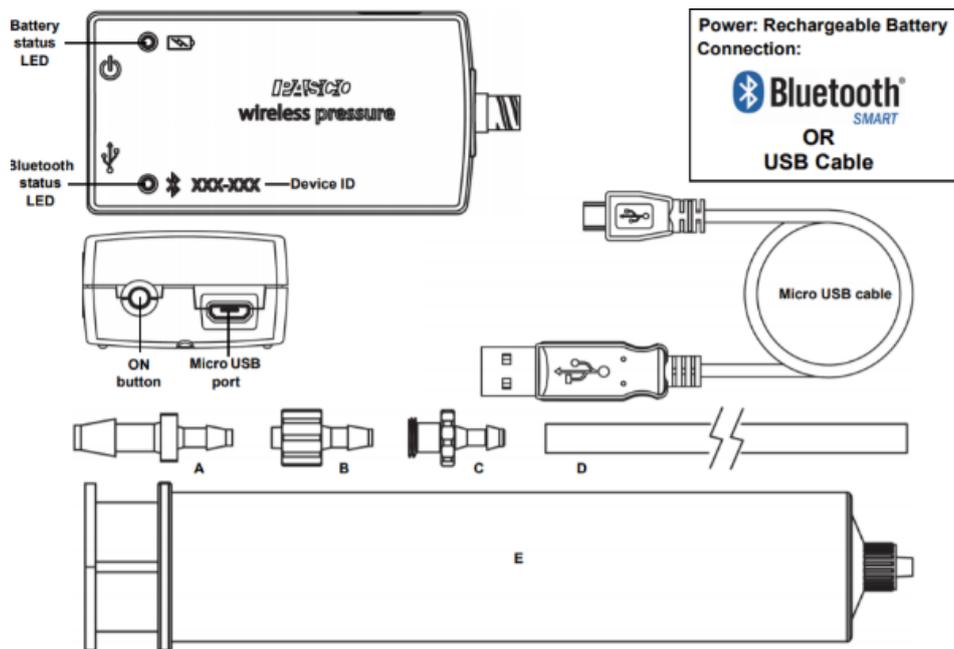


Figura 47: Sensor PASCO - Partes

#### 4.4. ENSAYOS

Se realizaron 18 ensayos en total, en los 16 primeros se hicieron mediciones con PIV aguas arriba del vertedero y sobre la rápida del vertedero, y en los Ensayo 12 y Ensayo 13 se hicieron mediciones con ADV y FlowTracker. En los últimos ensayos, Ensayo 17 y Ensayo 18, se midieron presiones en las tomas ubicadas aguas abajo del vertedero para poder evaluar la influencia de agregar un azud.

En la Tabla 8 puede verse un resumen de lo realizado en cada ensayo.

	<i>Q</i> modelo [l/s]	<i>Q</i> prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Hlimn [cm]	Hcresta [cm]	Descripción
ENSAYO 1	12,86	93,2	28,9	4,5	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 2	10,38	75,2	27,63	3,9	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 3	8,2	59,4	26,35	3,6	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 4	7,51	54,4	25,9	3,3	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 5	6,63	48,0	25,29	3	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 6	5,36	38,8	24,32	2,6	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 7	1,58	11,5	20,1	1	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 8	3,56	25,8	22,67	2	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 9	6,94	50,3	25,51	3,1	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 10	10,72	77,7	27,81	4	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 11	13,49	97,8	29,2	4,6	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 12	-	-	-	-	Se realizó el ensayo con PIV, ADV y FlowTracker
ENSAYO 13	6,43	46,6	25,15	2,9	Se realizó el ensayo con PIV, ADV Y FlowTracker, y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 14	12,49	90,5	28,72	4,4	Se realizó el ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 15	10,35	75,0	27,61	3,8	Se realizó ensayo con PIV, se midieron alturas de lámina sobre el vertedero y, aguas abajo, se observó la influencia de colocar el azud en una posición.
ENSAYO 16	11,4	82,6	28,17	4,1	Se realizó ensayo con PIV y se midieron alturas de lámina sobre el vertedero.
ENSAYO 17	6	43,48	24,83	2,5	Se midieron presiones con el sensor en las tomas aguas abajo, para evaluar la incidencia del azud en dos posiciones.
ENSAYO 18	7,81	56,60	26,1	3,4	Se midieron presiones con el sensor en las tomas aguas abajo, para evaluar la incidencia del azud en dos posiciones.

Tabla 8: Resumen ensayos realizados

#### 4.4.1. VELOCIDADES

Para medir velocidades se utilizaron tres técnicas diferentes: ADV, PIV y Flowtracker.

##### 4.4.1.1. ADV

Con el instrumental que se muestra en las figuras (Figura 48, Figura 49), se midió en tres distintas posiciones como se observa en la Figura 50 y para distintos caudales. Fue necesario realizar un sembrado para que el sensor pueda detectar la velocidad de las partículas. Se utilizó para contrastar y validar las velocidades obtenidas con PIV.



Figura 48: Sensor ADV



Figura 49: ADV

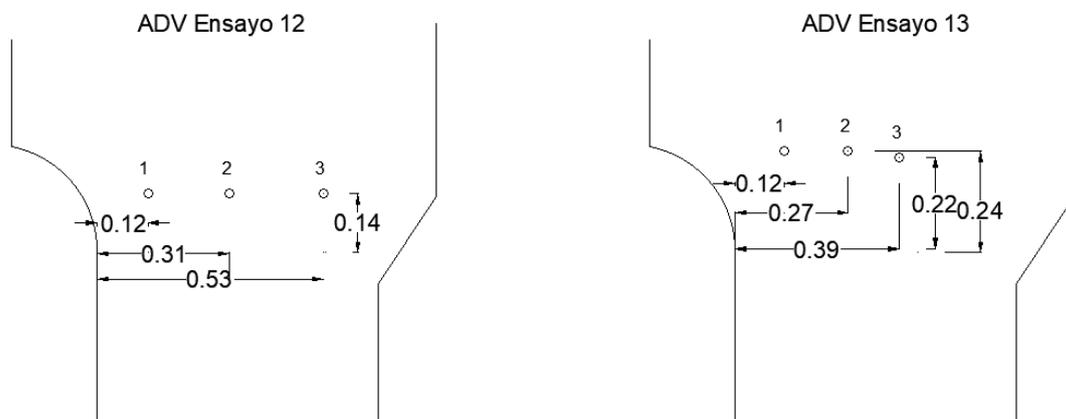


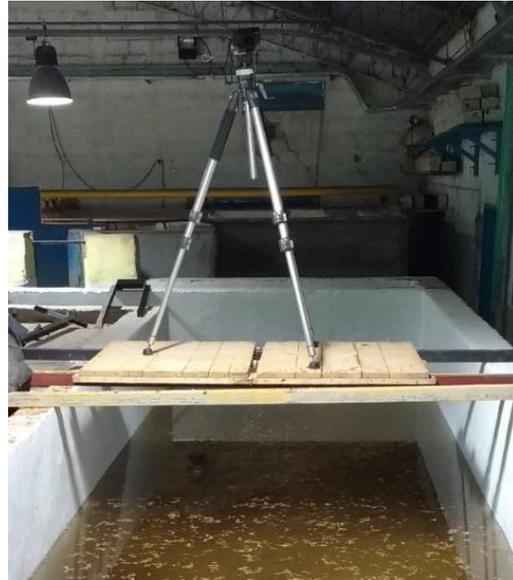
Figura 50: Ubicación de las 3 posiciones

#### 4.4.1.2. PIV

Para distintos caudales, se realizaron una serie de ensayos y para cada uno se procedió a realizar un sembrado con viruta (Figura 52) y filmar durante un minuto el recorrido de las partículas con la cámara que se ve en la Figura 51 para el trayecto aguas arriba.



**Figura 51: Cámara para filmar aguas arriba**



**Figura 52: Sembrado**

#### 4.4.1.2.1. PIVlab y RIVeR

Para poder implementar la técnica del LSPIV se requiere una serie de instrumentos tanto para las actividades de campo como para las de gabinete. Para las actividades de campo se necesita:

- Un dispositivo que cuente con una cámara el cual pueda grabar un video con una cierta calidad de resolución un curso de agua que se quiera medir ya sea canales artificiales, un arroyo o un río;
- Un elemento de medición de distancias como ser una regla, una cinta, etc. para poder medir los puntos fijos, los cuales servirán para poder realizar la rectificación de la imagen, lo cual se verá más adelante.

Ahora bien, para las actividades de gabinete se necesitan que la computadora con cual se trabajará tenga instalados los siguientes programas: PIVlab, Matlab (debido a que el PIVlab ha sido desarrollado en torno a este) y RIVeR.

El **PIVlab** (Figura 53) es un software de código abierto de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) que no solo calcula la distribución de velocidades entre un par de imágenes, sino

que también la derivación, visualización y exportación de varios parámetros del modelo del flujo. El mismo emplea una interfaz gráfica de uso (GUI) fácil para el usuario para poder realizar un análisis de PIV y un post-procesamiento de datos de forma rápida y eficiente. Debido a que ha sido desarrollado en torno al programa Matlab®, su funcionamiento necesita que este sea ejecutado.

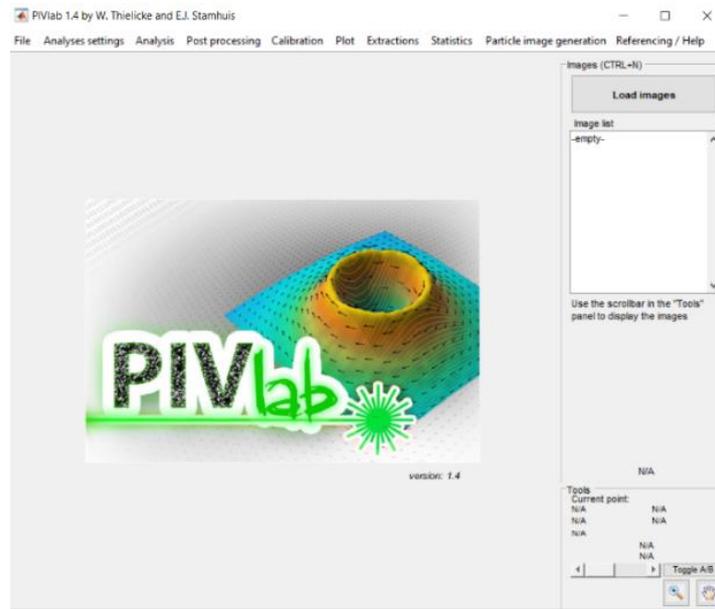


Figura 53: Interface PIVlab

El **RIVER**, por sus siglas en inglés, es una herramienta que ha sido desarrollado por el Centro de Estudios y Tecnologías del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) desde 2013. Su objetivo no solo es realizar una caracterización de los flujos de aguas superficiales tales como ríos, canales artificiales (riego, planta de tratamientos, etc.), sino también a los modelos físicos a gran escala en laboratorio. Este es desarrollado en Windows usando Matlab®. El RIVER es independiente del procesamiento de imágenes y utiliza como entrada cualquier resultado de la sesión ya sea de PIVlab o PTVlab, que son también, realizados en el entorno de Matlab®. Esta decisión reduce gramáticamente el esfuerzo computacional, especialmente cuando se trabaja con imágenes en Alta Definición (HD, por sus siglas en inglés).

La metodología propuesta para el análisis de LSPIV / LSPTV se compone de cuatro módulos principales (Patalano & García, 2016):

a) La adquisición de imágenes. Las imágenes en escala de grises de 8 bits son extraídas de un video a través del RIVER con el conjunto de sistemas multimedia gratuito que posee (FFmpeg, 2015). En esta etapa la tasa de fotogramas puede ser volver a muestrear si es necesario teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo es demasiada alta para el rango de velocidad en la que ha sido analizada. Una corrección opcional de la lente también se puede hacer si la cámara que se utiliza para la grabación ha sido previamente calibrada.

b) El procesamiento de imágenes. En este paso, las imágenes extraídas son procesadas ya sea por PIVlab o PTVlab con un estado avanzado de los algoritmos de arte, incluyendo pre-procesamiento y mejora de la imagen (Figura 93). Si se utiliza para el análisis PIV o PTV de una imagen dependerán

del tipo de información deseada y el tipo de trazador en la superficie del agua: si el campo de velocidad media es el propósito del análisis, es decir, para la estimación de la descarga, y la traza (naturales: como espuma, ramas de árboles; artificial: como virutas de madera o desde el punto de vista ecológico el material inocuo y biodegradable) es pulverizada de manera homogénea sobre la superficie del agua entonces las imágenes deben ser analizadas en un marco de trabajo euleriano con PIV.

c) Resultados de rectificación. Este es el módulo principal del RIVeR: en primer lugar, se calcula la matriz homografía sabiendo la relación siguiente en coordenadas homogéneas.

Cuando el vector en el lado derecho representa las coordenadas del mundo real, el vector de la izquierda representan la proyección en la imagen de la coordenadas del mundo real,  $H$  es la matriz homografía. De hecho, es lo que  $H$  es lo que se denomina la "matriz de cámara" con el supuesto de que todos los puntos están en el plano de la matriz  $Z = 0$ . En la matriz de cámara se colocan tanto los parámetros intrínsecos de la cámara (parámetros que dependen solamente de la cámara tales como la longitud focal, el zoom de la cámara y la escala pixel) y los parámetros extrínsecos (posición de la cámara y rotación). Entonces, se tiene  $H$  con 8 incógnitas que se pueden resolver conociendo las coordenadas  $(X, Y)$  de sólo 4 puntos de control (CP), también denominados Puntos de Referencia del Terreno, que están en el mismo plano. El plano  $Z = 0$  será elegido como la superficie del agua. Esto significa que con el fin de corregir los resultados del procesamiento de las imágenes por velocidad, (por lo menos) 4 puntos de control conocidos debe estar en el plano del nivel del agua. Debe tenerse en cuenta que los puntos de control no deben ser co-alineados. Luego, una vez que la sesión PIVlab ha sido importada en el RIVeR, los resultados son orto-rectificados con  $H^{-1}$  ya que la transformación puede ser invertida.

d) Cálculo del caudal de flujo: Una vez que el campo de velocidad media del flujo de superficie es calculado, una sección transversal cuya batimetría conocida es importada y el caudal asociado a esa sección es calculado. Los datos de batimetría se cargan desde un archivo de Excel. Si el perfil de velocidad sigue la ley logarítmica de pared (Chow, 1994), la relación teórica entre la velocidad media del flujo y la velocidad superficial es de 0,85. En la siguiente imagen (Figura 54) se muestra la interface del RIVeR.

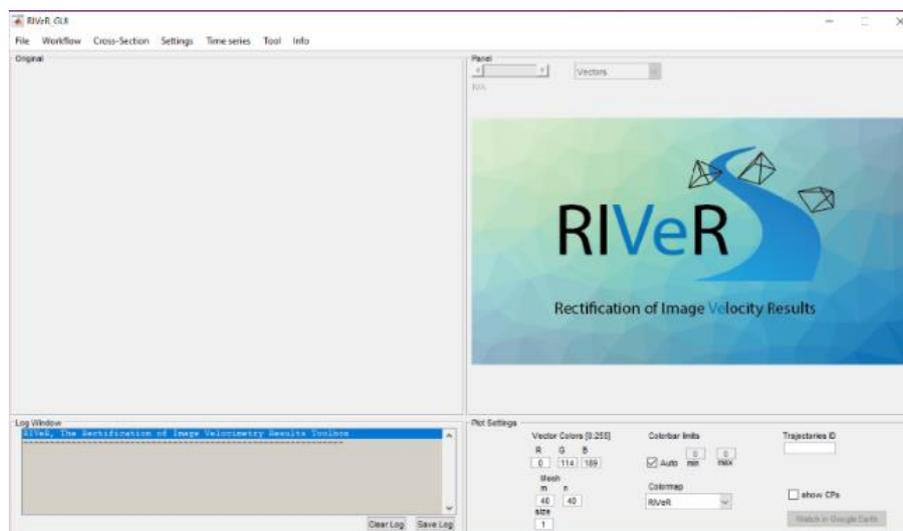
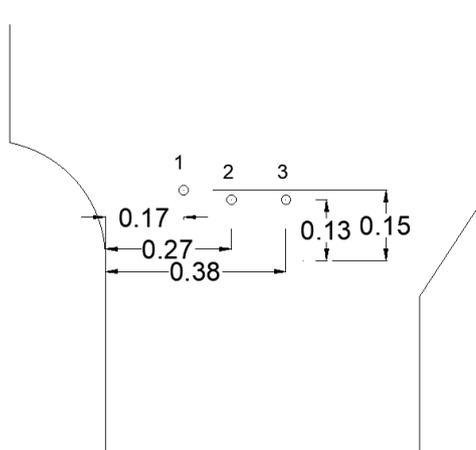


Figura 54: Interface RIVeR

#### 4.4.1.3. FLOWTRACKER

El procedimiento es similar al mencionado para la aplicación de ADV, se midió en tres distintas posiciones a lo ancho del modelo (Figura 55), cargando en cada posición las coordenadas correspondientes. Para los dos ensayos realizados (12 y 13) se utilizaron las mismas posiciones. En la Figura 56 se observa el instrumental.



**Figura 55: Ubicación de las 3 posiciones**



**Figura 56: Equipamiento FlowTracker**

#### 4.4.2. PRESIONES

Se midieron las presiones fluctuantes, con el sensor mencionado, en tres condiciones (Figura 57), para el ensayo 17 y ensayo 18:

- Sin azud.
- Azud en posición A.
- Azud en posición B.

Se midió en las tomas 20, 21, 23, 24, 25. Las lecturas corresponden a presiones absolutas, por lo que para obtener la presión en cada uno de los puntos se le debe restar la presión base (presión estática medida por el sensor en la toma).

En ninguna de las tomas se midieron presiones menores a la base, por lo cual no se espera que existan presiones de succión en el lecho del río.



Figura 57: Ubicaciones azud

#### 4.5. MEDICIONES REALIZADAS

Sobre el vertedero, para cada ensayo (distintos caudales) se midieron las alturas de la lámina en el margen derecho, medio y margen izquierdo, para la cresta, la parte media y la parte final del vertedero, estas posiciones pueden verse en la Figura 58. A la vez, se tomó lectura de las alturas brindadas por las liras piezométricas (16) ubicadas sobre el vertedero.

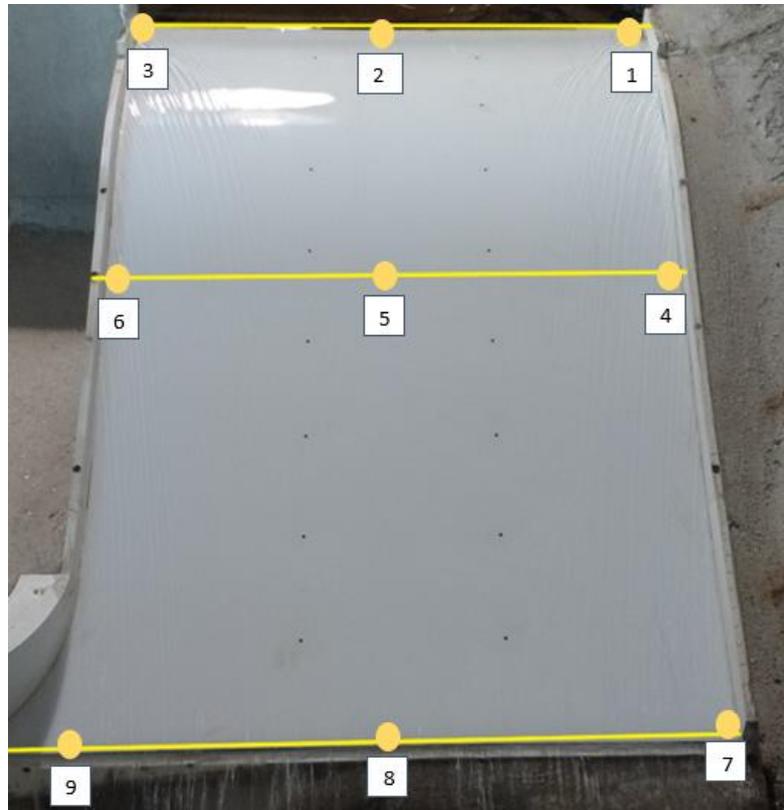


Figura 58: Posiciones donde se midió altura de lámina

Las mediciones obtenidas fueron las siguientes (Tabla 9):

	PUNTO 1 (cm)	PUNTO 2 (cm)	PUNTO 3 (cm)	PUNTO 4 (cm)	PUNTO 5 (cm)	PUNTO 6 (cm)	PUNTO 7 (cm)	PUNTO 8 (cm)	PUNTO 9 (cm)
ENSAYO 1	4,6	4,6	4,5	1,6	1,5	1,5	1,0	1,0	0,9
ENSAYO 2	4,1	4,0	4,0	1,3	1,2	1,2	0,9	0,8	0,8
ENSAYO 3	3,7	3,6	3,6	1,2	1,1	1,1	0,8	0,7	0,7
ENSAYO 4	3,4	3,3	3,3	1,0	0,9	0,9	0,6	0,6	0,5
ENSAYO 5	3,0	3,0	3,0	0,9	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5
ENSAYO 6	2,7	2,6	2,6	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
ENSAYO 7	1,0	1,0	0,9	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
ENSAYO 8	2,0	2,0	2,0	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3
ENSAYO 9	3,1	3,1	3,0	0,9	0,9	0,9	0,6	0,5	0,5
ENSAYO 10	4,0	4,0	3,9	1,1	1,1	1,1	0,9	0,8	0,8
ENSAYO 11	4,7	4,6	4,6	1,6	1,6	1,5	0,9	0,8	0,8
ENSAYO 13	3,0	2,9	2,9	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
ENSAYO 14	4,5	4,4	4,4	1,1	1,1	1,1	0,9	0,8	0,8
ENSAYO 15	3,9	3,8	3,8	1,3	1,2	1,2	0,8	0,7	0,7
ENSAYO 16	4,2	4,2	4,1	1,3	1,2	1,2	0,8	0,8	0,7
ENSAYO 18	3,5	3,4	3,4	1,0	1,0	0,9	0,5	0,4	0,4

**Tabla 9: Mediciones de lámina sobre vertedero**

Para poder analizar los ensayos se realizó una tabla (Tabla 10) relacionando las alturas promedio de los tres puntos en cada sección, con su caudal correspondiente.

Como se observa en la Figura 61, la aproximación polinómica a los datos planteados de la cresta es muy buena, en cambio para la Figura 59 (salida) y Figura 60 (centro) se empieza a ver algunos datos que podrían considerarse como aislados y eliminarlos, esto se debe a que como se refieren a la lámina centro y de salida es pequeña para los distintos caudales, entonces un error de la magnitud del mm influye en los resultados, en caso de querer hacerlo con mayor precisión, se debería optar por elementos de medición distintos que midan más decimales.

	Hcresta (cm)	Hcentro (cm)	Hsalida (cm)	Q (l/s)
ENSAYO 7	1,0	0,2	0,1	1,58
ENSAYO 8	2,0	0,6	0,4	3,56
ENSAYO 6	2,6	0,6	0,4	5,36
ENSAYO 13	2,9	1,0	0,5	6,43
ENSAYO 5	3,0	0,8	0,5	6,63
ENSAYO 9	3,1	0,9	0,5	6,94
ENSAYO 4	3,3	0,9	0,6	7,51
ENSAYO 3	3,6	1,1	0,7	8,20
ENSAYO 15	3,8	1,2	0,7	10,35
ENSAYO 10	4,0	1,1	0,8	10,38
ENSAYO 2	4,0	1,2	0,8	10,72
ENSAYO 16	4,2	1,2	0,8	11,40
ENSAYO 14	4,4	1,1	0,8	12,49
ENSAYO 1	4,6	1,5	1,0	12,86
ENSAYO 11	4,6	1,6	0,8	13,49

**Tabla 10: Promedio de altura de láminas con su caudal correspondiente**

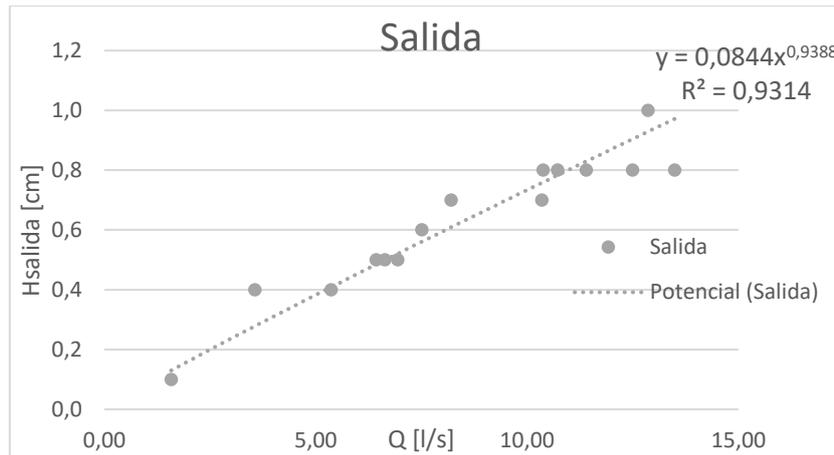


Figura 59: Relación H-Q en la salida del vertedero

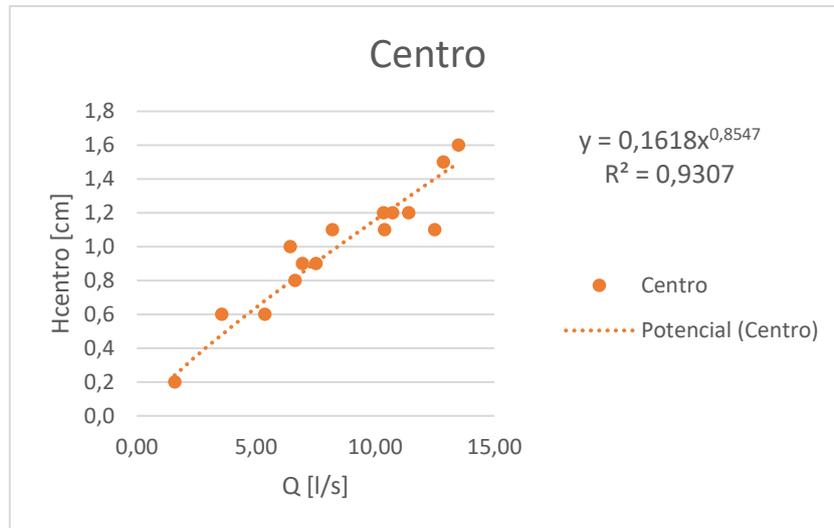


Figura 60: Relación H-Q en el centro del vertedero

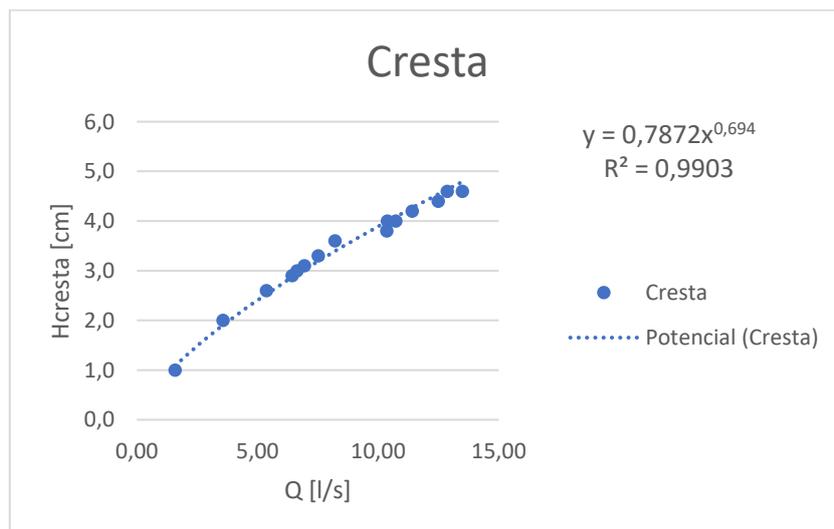


Figura 61: Relación H-Q en la cresta del vertedero

## 5. RESULTADOS

Como se mencionó, se realizaron 18 ensayos en total, a continuación, se presentarán los resultados obtenidos en los mismos.

Se presenta la definición de la cuenca, así como también las lluvias de diseños obtenidas para distintas duraciones, las cuales luego fueron procesadas mediante HEC-HMS para obtener los caudales relacionados.

Se realizó la curva H-Q, aproximándola de distintas maneras (polinómica, logarítmica) y también, se presentan los valores de velocidad (de algunos ensayos) obtenidos tanto aguas arriba como sobre el vertedero.

Para evaluar la conveniencia de colocar o no el azud, se realizaron ensayos de presión en distintas tomas, viendo así la variación de comportamiento sin azud, con azud en posición A y con azud en posición B.

A continuación, en la Tabla 6, se presenta un resumen de lo obtenido y hecho en los ensayos.

### 5.1. CURVA ALTURA-CAUDAL

A partir de las mediciones de lámina hechas sobre la cresta del vertedero y con el caudal obtenido con la lectura del limnómetro, (Tabla 11) se calculó la curva H-Q con los datos de cada ensayo, esta relación puede verse en la Tabla 12.

	<b>H</b> [cm]	<b>Cd</b>	<b>Lectura</b> [cm]	<b>Qmod</b> [l/s]	<b>qmod</b> [l/s.m]
ENSAYO 1	15,39	0,5859	28,9	12,86	25,72
ENSAYO 2	14,12	0,5867	27,63	10,38	20,77
ENSAYO 3	12,84	0,5877	26,35	8,20	16,40
ENSAYO 4	12,39	0,5882	25,9	7,51	15,02
ENSAYO 5	11,78	0,5889	25,29	6,63	13,25
ENSAYO 6	10,81	0,5902	24,32	5,36	10,71
ENSAYO 7	6,59	0,6009	20,1	1,58	3,17
ENSAYO 8	9,16	0,5933	22,67	3,56	7,12
ENSAYO 9	12	0,5886	25,51	6,94	13,87
ENSAYO 10	14,3	0,5865	27,81	10,72	21,43
ENSAYO 11	15,69	0,5858	29,2	13,49	26,99
ENSAYO 13	11,64	0,5890	25,15	6,43	12,86
ENSAYO 14	15,21	0,5860	28,72	12,49	24,98

Tabla 11: Caudales obtenidos a partir de lectura limnómetro

	Qprototipo (m3/s)	Q	H (centro)
		SUPERIOR	
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,9
ENSAYO 8	25,8	3,56	2
ENSAYO 6	38,8	5,36	2,6
ENSAYO 13	46,6	6,43	2,9
ENSAYO 5	48,0	6,63	3
ENSAYO 9	50,3	6,94	3
ENSAYO 4	54,4	7,51	3,3
ENSAYO 3	59,4	8,2	3,6
ENSAYO 2	75,2	10,38	3,9
ENSAYO 10	77,7	10,72	3,9
ENSAYO 14	90,5	12,49	4,4
ENSAYO 1	93,2	12,86	4,5
ENSAYO 11	97,8	13,49	4,6

Tabla 12: Relación altura caudal

### 5.1.1. COMPARACION CON CURVA TEORICA

Una vez obtenidos los valores, se procedió a graficar la relación H-Q, aproximándola según una función polinómica (Figura 63) y otra potencial (Figura 64), para luego compararlas con la teórica.

En la siguiente Tabla 13, se observan los distintos valores obtenidos en las aproximaciones para poder compararlos como se ve en la Figura 65.

	Qmod (l/s)	H cresta (cm)	H <sup>1,5</sup> (cm)	Q (l/s) $y = 1,5968x^{1,34}$	Q (l/s) $y = 0,4272x^2 + 0,9522x$	Q teorico Sotello (l/s)
ENSAYO 7	1,58	0,9	0,85	1,39	1,20	1,15
ENSAYO 8	3,56	2	2,83	4,04	3,61	3,82
ENSAYO 6	5,36	2,6	4,19	5,75	5,36	5,66
ENSAYO 13	6,43	2,9	4,94	6,65	6,35	6,67
ENSAYO 5	6,63	3	5,20	6,96	6,70	7,02
ENSAYO 9	6,94	3	5,20	6,96	6,70	7,02
ENSAYO 4	7,51	3,3	5,99	7,91	7,79	8,10
ENSAYO 3	8,2	3,6	6,83	8,89	8,96	9,23
ENSAYO 2	10,38	3,9	7,70	9,89	10,21	10,40
ENSAYO 10	10,72	3,9	7,70	9,89	10,21	10,40
ENSAYO 14	12,49	4,4	9,23	11,63	12,46	12,47
ENSAYO 1	12,86	4,5	9,55	11,98	12,94	12,90
ENSAYO 11	13,49	4,6	9,87	12,34	13,42	13,33

Tabla 13: Comparación entre H-Q y aproximaciones

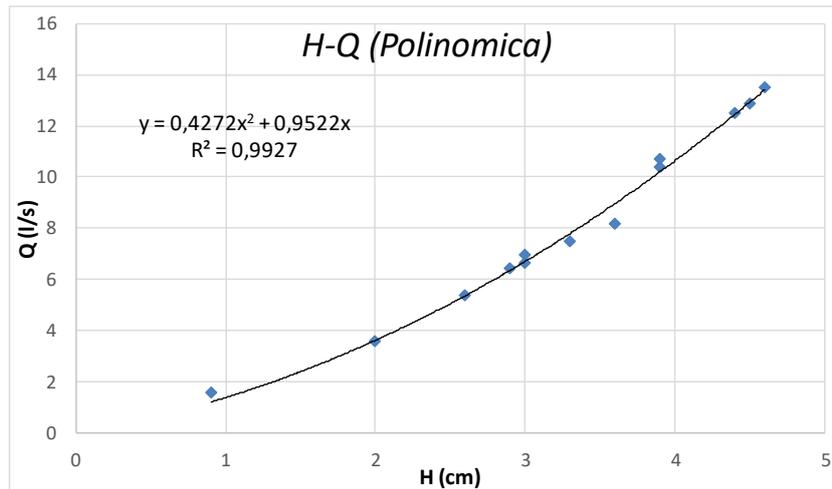


Figura 62: Curva H-Q aproximada de manera polinómica

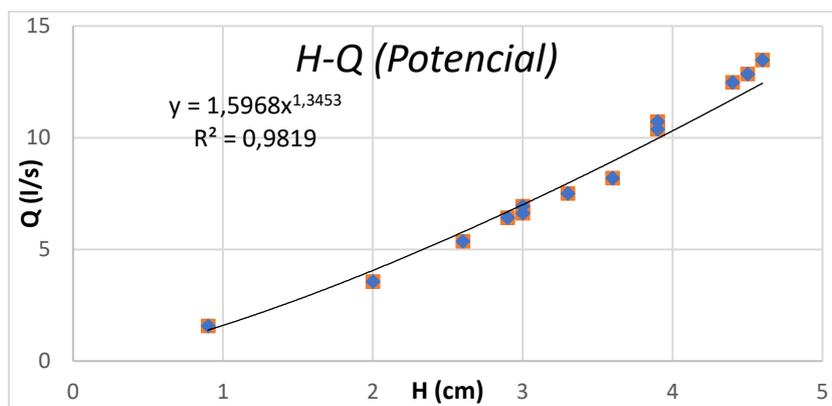


Figura 63: Curva H-Q aproximada de manera potencial

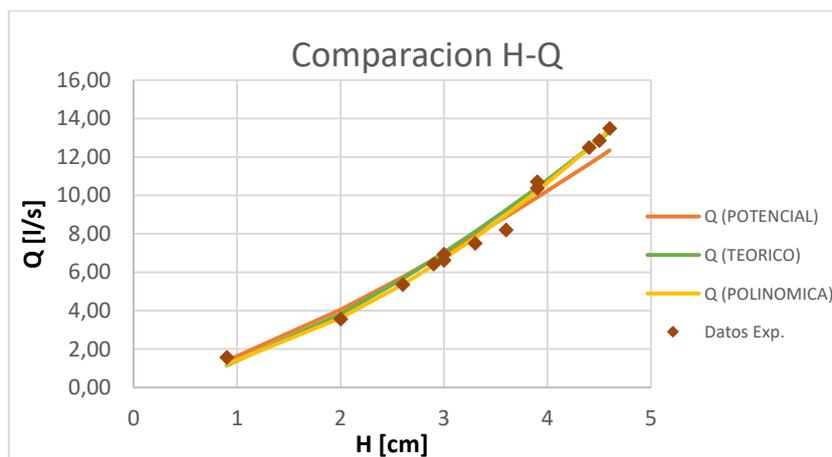


Figura 64: Curva H-Q comparación de distintas aproximaciones

Como se presentó en cada gráfico correspondiente, el  $R^2$  de la polinómica es 0.99 y el de la potencial 0.98, esto lo podemos ver reflejado en la Figura 65, ya que, al principio todas las aproximaciones representan bien los datos, hasta determinada altura de la lámina, un poco mayor a 3 cm, donde se observan 1 o 2 datos que se los podría eliminar, y luego en los últimos se ve como la potencial se aleja un poco, y la polinómica y teórica se ajustan a los datos.

## 5.2. MEDICION DE VELOCIDADES

### 5.2.1. AGUAS ARRIBA

Se adjuntan a continuación (Tabla 14 y Tabla 15) los resultados obtenidos con los distintos métodos utilizados, es de mencionar que se realizaron mediciones con ADV para ensayo 12 y 13 solamente y, para Flowtracker ensayo 13 y 14.

**ENSAYO 12 - ADV**

Punto		Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	RMS (Vx)	RMS (Vy)	RMS (Vz)	COR	SNR
1	FILTRADO	0,117	-0,009	0,035	1,0026	1,2337	1,1774	81,94	5,77
	NO FILTRADO	0,117	-0,009	0,035	0,9860	1,2313	1,1781	81,99	5,78
2	FILTRADO	0,127	0,023	0,050	0,9573	1,4737	1,0474	82,08	14,66
	NO FILTRADO	0,126	0,022	0,049	2,0002	1,7018	1,1177	81,29	14,53
3	FILTRADO	0,165	0,038	0,039	1,3406	1,4349	0,5863	74,44	3,36
	NO FILTRADO	0,165	0,037	0,038	1,8082	2,3796	0,6488	73,48	3,29

**ENSAYO 13 - ADV**

Punto		Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	RMS (Vx)	RMS (Vy)	RMS (Vz)	COR	SNR
1	FILTRADO	0,060	-0,005	0,017	1,0323	1,4624	0,8641	83,00	35,94
	NO FILTRADO	0,086	-0,004	0,012	12,2553	14,1501	3,1538	76,70	35,71
2	FILTRADO	0,069	0,005	0,018	1,4145	1,9629	0,6362	73,24	32,69
	NO FILTRADO	0,127	-0,004	0,003	16,9582	17,6059	4,1475	67,49	32,74
3	FILTRADO	0,078	0,012	0,016	1,7285	2,3890	0,6493	69,59	36,84
	NO FILTRADO	0,144	-0,012	0,000	20,5460	23,6683	4,9543	64,58	36,77

**Tabla 14: Resultado de velocidades ensayos ADV**

Como se observa en el ensayo 13 de la Tabla 12, la diferencia entre los resultados filtrados y no filtrados es muy amplia, de hasta el 50%, por eso es importante luego compararlos con lo obtenido con PIV para ver la confiabilidad del mismo.

**ENSAYO 13 - FLOWTRACKER**

Punto	Loc	VelX	VelY	Angle	SNR1	SNR2	VxErr	VyErr	VzErr
	(m)	(m/s)	(m/s)	(deg)	(dB)	(dB)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	0,165	0,084	-0,004	-2,938	37,653	36,693	0	0	0
2	0,265	0,091	0,002	1,028	37,053	36,523	0	0	0
3	0,380	0,098	0,003	1,864	36,865	36,183	0	0,001	0

**ENSAYO 14 - FLOWTRACKER**

Punto	Loc	VelX	VelY	Angle	SNR1	SNR2	VxErr	VyErr	VzErr
	(m)	(m/s)	(m/s)	(deg)	(dB)	(dB)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	0,302	0,020	-0,002	-4,704	31,424	30,216	0	0	0
2	0,086	0,023	0,002	4,468	30,210	28,782	0,001	0	0
3	0,070	0,108	0,004	2,364	30,558	30,220	0	0	0

**Tabla 15: Resultado de velocidades ensayos FlowTracker**

En la Figura 65, se puede ver, gráficamente, las velocidades compuestas en cada punto obtenidas por medio de los ensayos realizados con FlowTracker, y en la Figura 66 las velocidades compuestas para las tres posiciones, en los dos ensayos hechos con ADV.

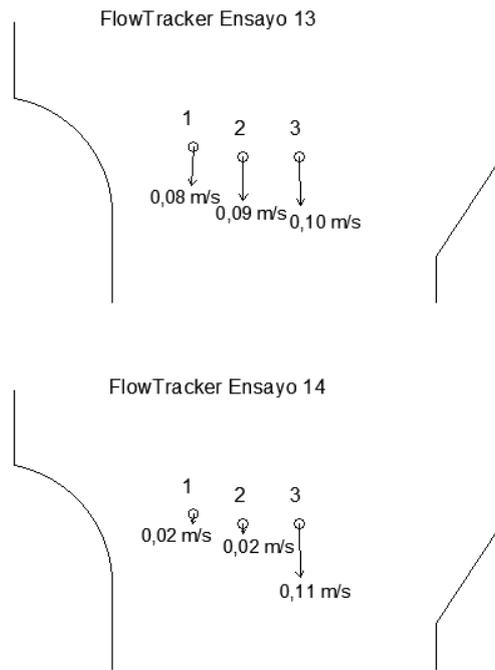


Figura 65: Velocidades compuestas ensayos FlowTracker

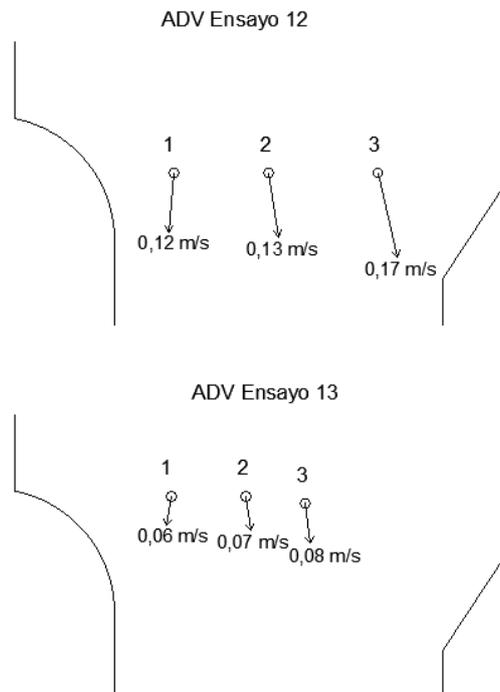
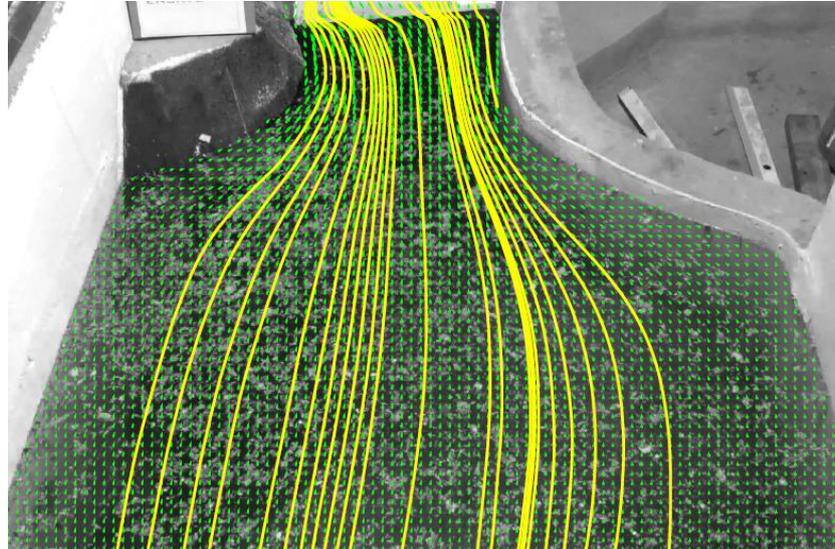
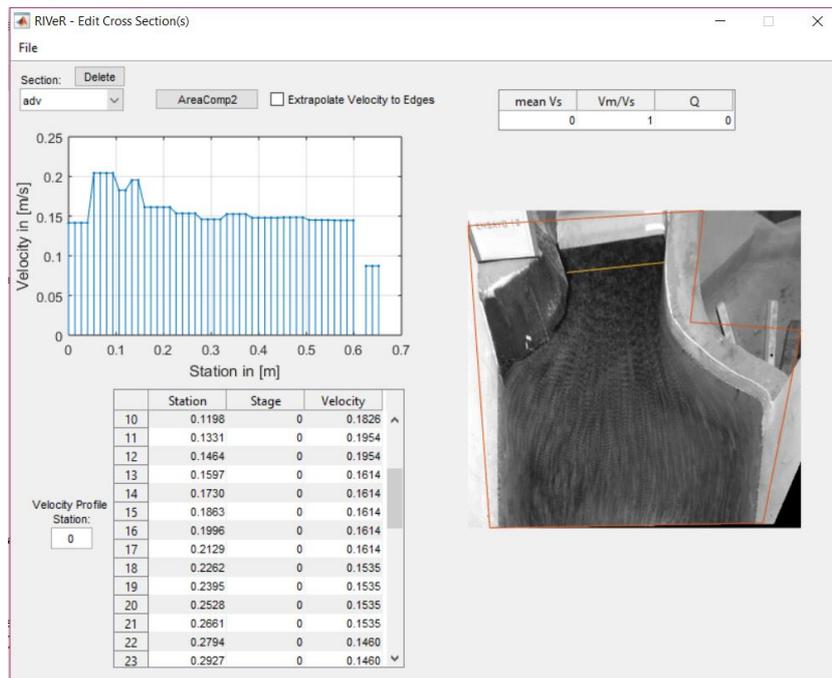


Figura 66: Velocidades compuestas ensayos ADV

De lo analizado con PIV se adjuntan resultados relevantes, principalmente para poder comparar con los valores obtenidos con ADV y FlowTracker, por lo cual se adjuntan los resultados de los ensayos 12 y 13.



**Figura 68: Líneas de corriente Ensayo 12**



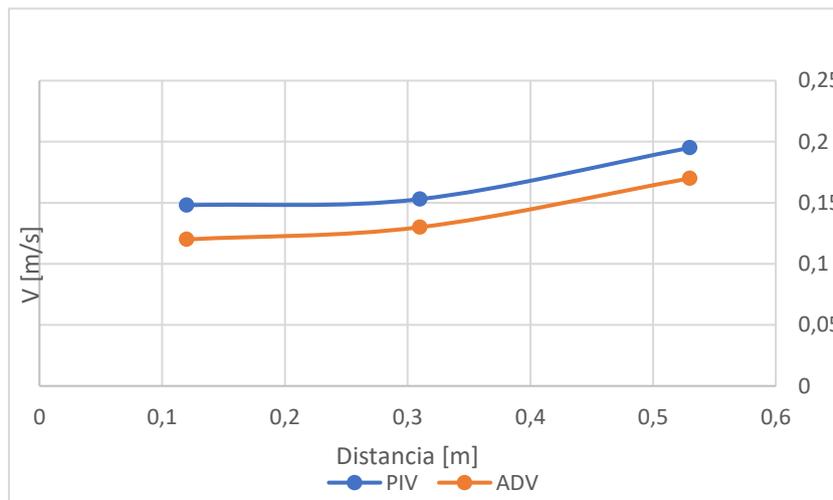
**Figura 67: Perfil de velocidades Ensayo 12**

En la Figura 67 se presentan las líneas de corrientes obtenidas al analizar el video del Ensayo 12 en PIVlab, luego, en la Figura 68 se muestra el perfil de velocidades (obtenido mediante la aplicación del programa RIVeR) que se presenta a 14 cm de la cresta del vertedero que es la posición donde se realizó el ensayo de ADV.

Se localizaron los mismos puntos donde midió con ADV y se obtuvieron allí las siguientes velocidades (Tabla 16).

	<b>PIV</b>	<b>ADV</b>	
<i>Punto</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Distancia [m]</i>
1	0,148	0,12	0,12
2	0,153	0,13	0,31
3	0,195	0,17	0,53

**Tabla 16: Comparación de velocidades PIV-ADV Ensayo 12**



**Figura 69: Comparación velocidades ADV-PIV**

En la Tabla 16, se observa la comparación de velocidades obtenidas para el Ensayo 12, obtenidos a partir de PIV y ADV, se observa una distribución uniforme con mayores velocidades en superficie como era de esperarse lo cual es representado por las velocidades de PIV, y además, se puede ver la tendencia a mayores velocidades hacia el margen izquierdo, puede verse esto gráficamente en la Figura 69.

En la Figura 70 se muestra el perfil de velocidades obtenidos por medio del programa RIVER a 14 cm de la cresta para poder compararlo con los resultados de FlowTracker y en la Figura 72 se muestra también el perfil de velocidades del Ensayo 13 pero a 23 cm para comparar con los resultados de ADV. Las líneas de corriente del Ensayo 13 pueden verse en la Figura 71.

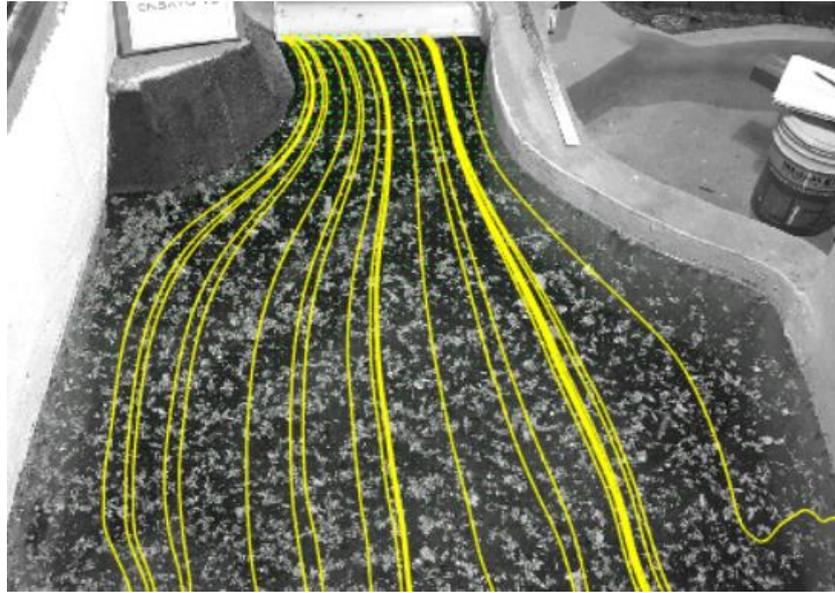


Figura 70: Líneas de corriente Ensayo 13

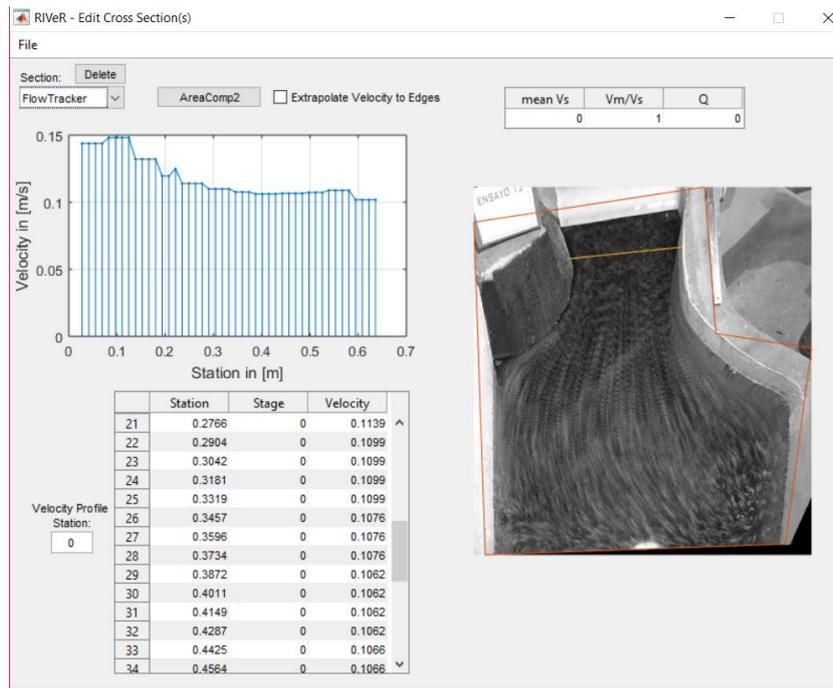


Figura 71: Perfil de velocidades Ensayo 13 a 13 cm

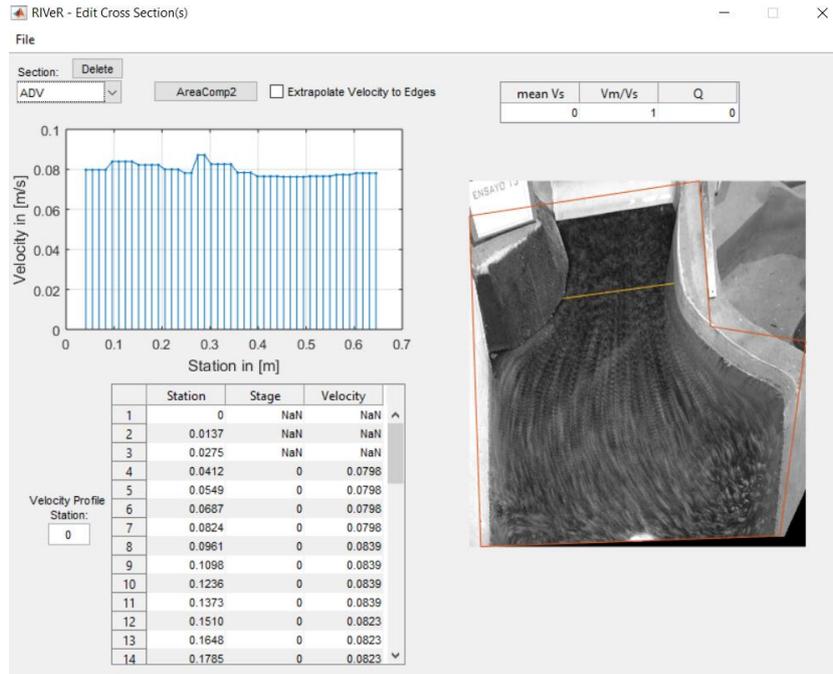


Figura 72: Perfil de velocidades Ensayo 13 a 23 cm

En la Tabla 17 se observan la comparación de velocidades obtenidas para el Ensayo 13 por medio de PIV y FlowTracker, esto mismo se ve gráficamente en la Figura 74. Se repite el mismo comportamiento explicado para el Ensayo 12, es decir, una distribución uniforme de velocidades en altura: se obtuvieron mayores velocidades con PIV que mide en superficie que con FlowTracker que mide aproximadamente a 3 cm.

	PIV	FlowTracker	
<i>Punto</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Distancia [cm]</i>
1	0,11	0,08	0,17
2	0,11	0,09	0,27
3	0,11	0,10	0,38

Tabla 17: Comparación de velocidades PIV-FlowTracker Ensayo 13

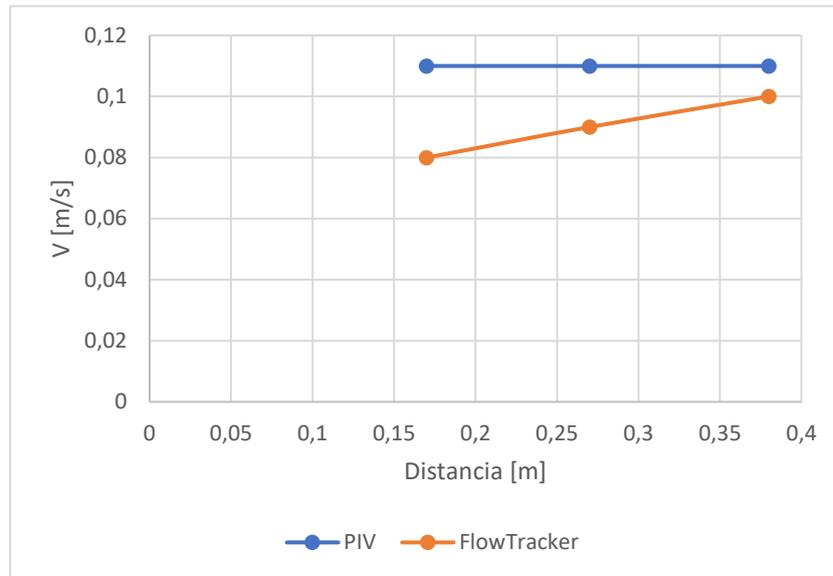


Figura 74: Comparación velocidades FlowTracker-PIV

Punto	PIV	ADV	Distancia [m]
	Velocidad [m/s]	Velocidad [m/s]	
1	0,08	0,06	0,12
2	0,08	0,07	0,27
3	0,08	0,08	0,39

Tabla 18: Comparación de velocidades PIV-ADV Ensayo 13

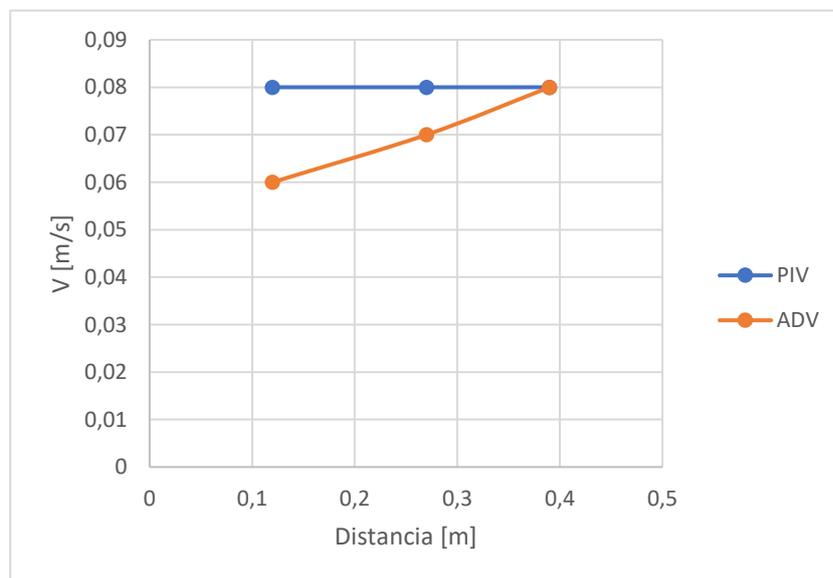


Figura 73: Comparación velocidades ADV-PIV

En la Tabla 18 se observan la comparación de velocidades obtenidas para el Ensayo 13 por medio de PIV y ADV a 23 cm de la cresta del vertedero, esto mismo se ve gráficamente en la Figura 73. Se repite el mismo comportamiento explicado para el Ensayo 12, es decir, una distribución uniforme de velocidades en altura: se obtuvieron mayores velocidades con PIV que mide en superficie que con ADV que mide aproximadamente a 3 cm.

### 5.2.2. SOBRE EL VERTEDERO

A partir de las mediciones de la altura de la lámina sobre el vertedero ya mencionadas, se obtuvieron las siguientes velocidades para el modelo y el prototipo, esto se presenta en la Tabla 19.

	Qprototipo (m3/s)	Qmodelo	H (centro)	Vmodelo (m/s)	Vprototipo (m/s)
<b>MEDIO</b>					
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,20	1,20	7,11
ENSAYO 8	25,8	3,56	0,60	0,90	5,34
ENSAYO 6	38,8	5,36	0,60	1,36	8,04
ENSAYO 13	46,6	6,43	1,00	0,98	5,79
ENSAYO 5	48,0	6,63	0,80	1,26	7,46
ENSAYO 9	50,3	6,94	0,90	1,17	6,94
ENSAYO 4	54,4	7,51	1,10	1,04	6,15
ENSAYO 3	59,4	8,20	1,10	1,13	6,71
ENSAYO 15	75,0	10,35	1,20	1,31	7,76
ENSAYO 2	75,2	10,38	1,20	1,32	7,79
ENSAYO 10	77,7	10,72	1,10	1,48	8,77
ENSAYO 16	82,6	11,40	1,20	1,45	8,55
ENSAYO 14	90,5	12,49	1,10	1,73	10,22
ENSAYO 1	93,2	12,86	1,50	1,30	7,72
ENSAYO 11	97,8	13,49	1,50	1,37	8,10

	Qprototipo (m3/s)	Qmodelo	H (centro)	Vmodelo (m/s)	Vprototipo (m/s)
<b>SUPERIOR</b>					
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,90	0,27	1,58
ENSAYO 8	25,8	3,56	2,00	0,27	1,60
ENSAYO 6	38,8	5,36	2,60	0,31	1,86
ENSAYO 13	46,6	6,43	2,90	0,34	2,00
ENSAYO 5	48,0	6,63	3,00	0,34	1,99
ENSAYO 9	50,3	6,94	3,00	0,35	2,08
ENSAYO 4	54,4	7,51	3,30	0,35	2,05
ENSAYO 3	59,4	8,20	3,60	0,35	2,05
ENSAYO 15	75,0	10,35	3,80	0,41	2,45
ENSAYO 2	75,2	10,38	3,90	0,41	2,40
ENSAYO 10	77,7	10,72	3,90	0,42	2,47
ENSAYO 16	82,6	11,40	4,10	0,42	2,50
ENSAYO 14	90,5	12,49	4,40	0,43	2,56
ENSAYO 1	93,2	12,86	4,50	0,43	2,57
ENSAYO 11	97,8	13,49	4,60	0,45	2,64

	Qprototipo (m3/s)	Qmodelo	H (centro)	Vmodelo (m/s)	Vprototipo (m/s)
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,10	2,40	14,22
ENSAYO 8	25,8	3,56	0,30	1,81	10,68
ENSAYO 6	38,8	5,36	0,40	2,04	12,06
ENSAYO 13	46,6	6,43	0,50	1,96	11,58
ENSAYO 5	48,0	6,63	0,50	2,02	11,94
ENSAYO 9	50,3	6,94	0,50	2,11	12,50
ENSAYO 4	54,4	7,51	0,50	2,29	13,52
ENSAYO 3	59,4	8,20	0,60	2,08	12,30
ENSAYO 15	75,0	10,35	0,70	2,25	13,31
ENSAYO 2	75,2	10,38	0,80	1,97	11,68
ENSAYO 10	77,7	10,72	0,80	2,04	12,06
ENSAYO 16	82,6	11,40	0,70	2,48	14,66
ENSAYO 14	90,5	12,49	0,80	2,38	14,06
ENSAYO 1	93,2	12,86	0,90	2,17	12,86
ENSAYO 11	97,8	13,49	0,80	2,57	15,18

Tabla 19: Velocidades sobre el vertedero a partir de medición lamina

También, mediante PIV, se midieron las velocidades sobre el vertedero, se adjunta el resultado del Ensayo 10 (Figura 75).

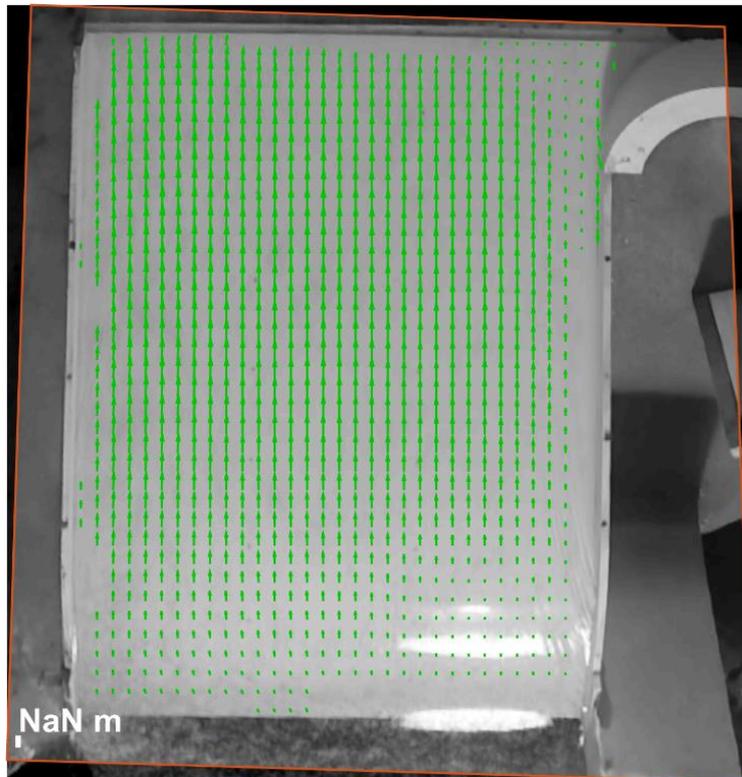


Figura 75: Campo de velocidades - Ensayo 10

En las Figura 76, Figura 77 y Figura 78 se observan los perfiles de velocidades obtenidos en el programa RIVeR, las cuales serán utilizadas para comparar con las obtenidas a partir de las mediciones de las alturas de lámina. Se realizaron los ensayos para la cresta, el centro y la salida del vertedero.

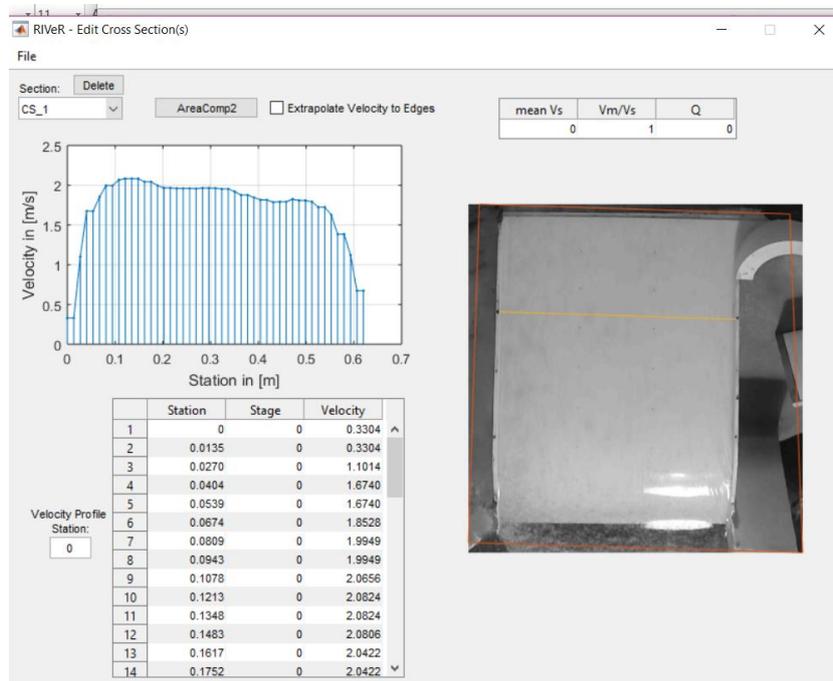


Figura 76: Perfil de velocidades en la salida del vertedero– Ensayo 10

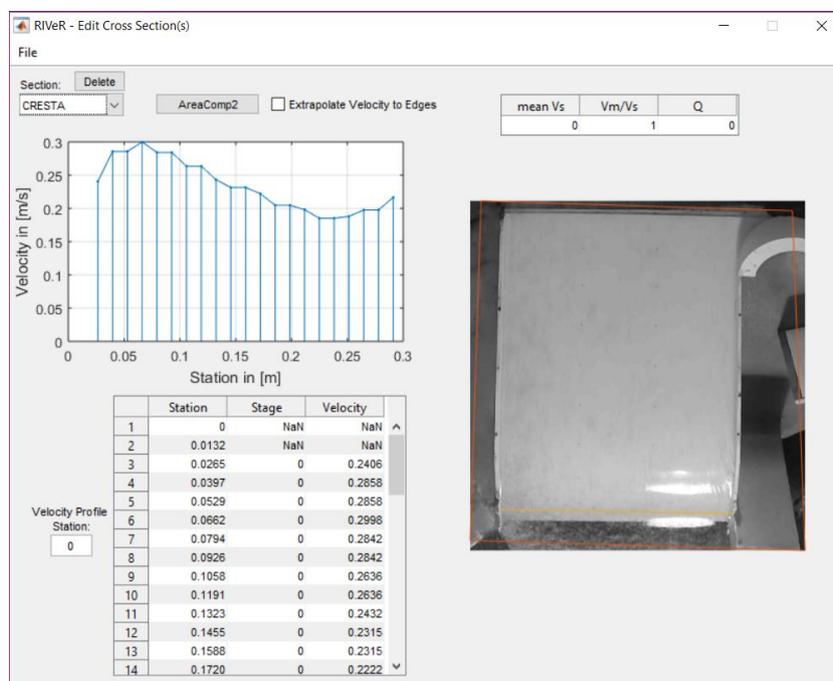


Figura 77: Perfil de velocidades en la cresta del vertedero– Ensayo 10

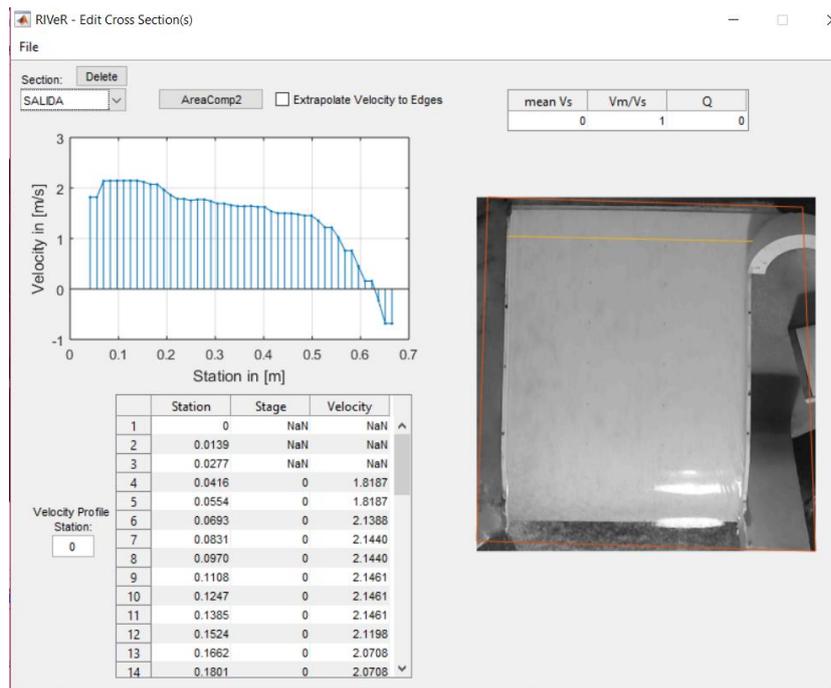


Figura 78: Perfil de velocidades en el centro del vertedero– Ensayo 10

Con los datos obtenidos de PIV, se calculó el caudal para compararlo con lo obtenido a partir de la altura de la lámina (Tabla 18), se optó por tomar la velocidad máxima que dan los resultados expuestos (Figura 75, Figura 76 y Figura 77), ya que muchas de las fluctuaciones que se presentan se deben a falta de material, sembrado escaso. Estos caudales se calcularon como:

$$Q = \text{ancho} * H_{\text{lamina}} * V_{\text{media}} \quad (37)$$

$$Q_{\text{cresta}} = 0,66 \text{ m} * 0,039 \text{ m} * 0,30 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,72 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{centro}} = 0,66 \text{ m} * 0,011 \text{ m} * 1,70 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 12,34 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{salida}} = 0,66 \text{ m} * 0,008 \text{ m} * 1,58 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 8,34 \text{ l/s}$$

El caudal del Ensayo 10 obtenido a partir de la altura de la lámina es 10,73 l/s, si bien los caudales no son idénticos, son muy próximos, esto se puede deber a que se utilizó la velocidad media, y como se mencionó la misma puede fluctuar dependiendo del sembrado presente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el Ensayo 8 a partir de procesar el video mediante el uso de PIVlab y RIVeR. En la Figura 79 se puede ver el campo de velocidades obtenidos sobre el vertedero.

En la Figura 80, se puede ver el perfil de velocidades obtenido para la cresta del vertedero del Ensayo 8, en la Figura 80 y Figura 81 se presenta lo mismo para el centro y la salida del vertedero.

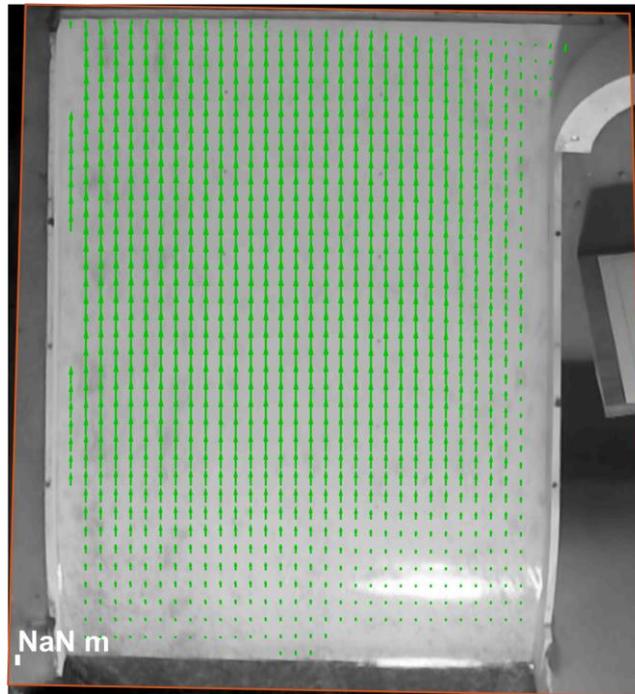


Figura 79: Campo de velocidades Ensayo 8

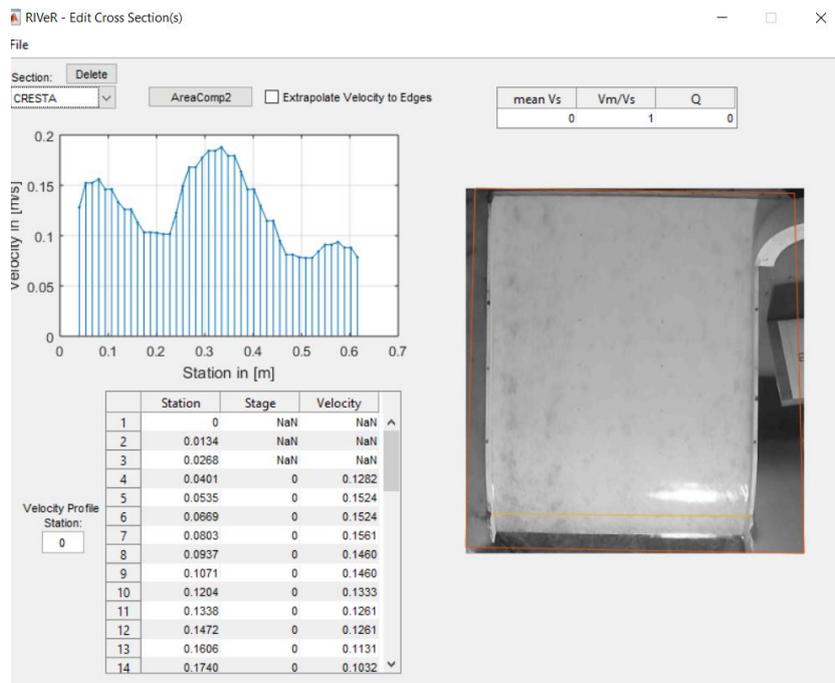


Figura 80: Perfil de velocidades en la cresta - Ensayo 8

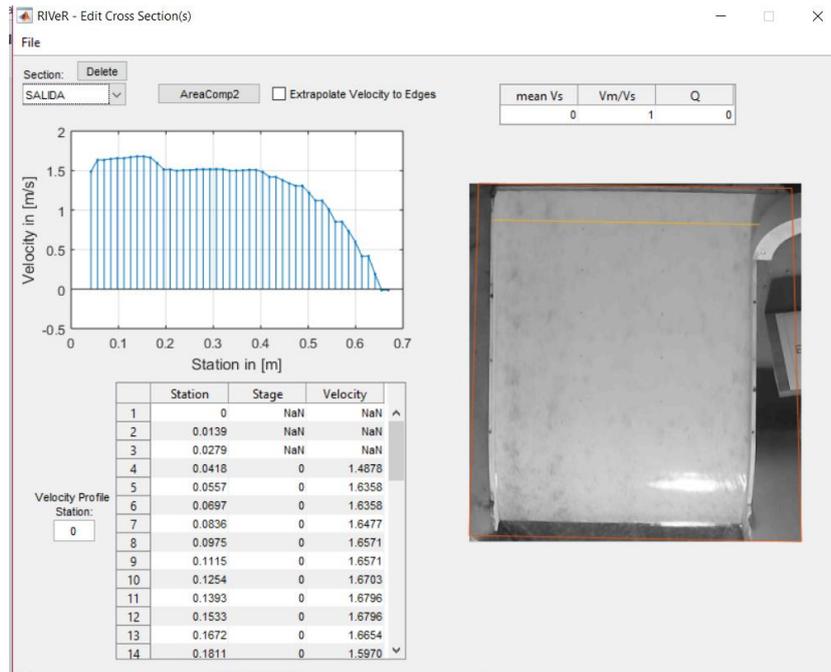


Figura 80: Perfil de velocidades a la salida - Ensayo 8

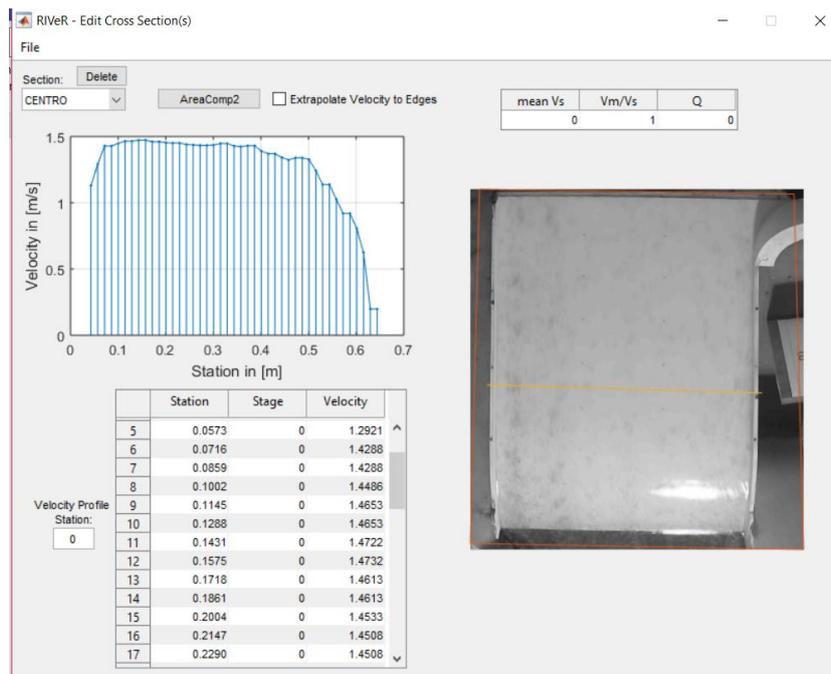


Figura 81: Perfil de velocidades en el centro - Ensayo 8

Al igual que como se realizó en el Ensayo 10, se calculó el caudal a partir de la velocidad brindada por el programa, con la ecuación 37. Se obtuvo los siguientes resultados:

$$Q_{cresta} = 0,66 \text{ m} * 0,02 \text{ m} * 0,13 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,72 \text{ l/s}$$

$$Q_{centro} = 0,66 \text{ m} * 0,006 \text{ m} * 1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4,95 \text{ l/s}$$

$$Q_{salida} = 0,66 \text{ m} * 0,004 \text{ m} * 1,34 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,54 \text{ l/s}$$

El caudal obtenido a partir de la medición de láminas para el Ensayo 8 es de 3,56 l/s, lo que se puede ver en la Tabla 18. Observando los resultados, se ve que el caudal obtenido a la salida es igual al calculado anteriormente, en cambio, los caudales en la cresta y el centro difieren mucho del valor en comparación, al igual que se mencionó para el Ensayo 10, esto se puede deber a falta de material de sembrado y a errores de lectura al medir la altura de lámina.

### 5.3. PRESIONES

#### 5.3.1. PIEZOMETRICAS

A partir de las lecturas de las liras en cada ensayo realizado, y restándole a este la lectura base (lectura de las liras cuando no circula agua por las mismas), se obtuvieron las presiones sobre las tomas del vertedero. En la Tabla 20 se observan los valores obtenidos a partir de las lecturas.

	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Lo</b>	44,40	43,30	-	34,90	29,10	23,40	18,10	13,10
<b>L</b>	47,70	45,40	-	36,20	30,70	25,10	19,10	14,00
	47,20	45,20	-	36,10	30,50	24,90	18,90	13,70
	47,00	45,10	-	36,10	30,50	24,90	18,90	13,70
	46,80	45,00	-	36,00	30,40	24,80	18,80	13,60
	46,60	44,90	-	35,90	30,40	24,60	18,60	13,50
	46,40	44,80	-	35,70	30,20	24,50	18,50	13,40
	45,60	44,20	-	35,40	29,70	24,10	18,50	13,60
	45,90	44,40	-	35,50	29,80	24,20	18,50	13,50
	46,50	44,80	-	35,70	30,00	24,40	19,80	14,90
	47,30	45,20	-	36,00	30,50	24,90	19,80	14,80
	47,85	45,50	-	36,30	30,90	25,10	19,10	14,10
	46,60	44,90	-	35,90	30,30	24,50	19,00	13,90
	47,80	45,50	-	36,50	30,90	25,20	19,10	14,40
47,40	45,20	-	36,00	30,60	24,90	18,90	14,00	
<b>L</b>	3,30	2,10	-	1,30	1,60	1,70	1,00	0,90
	2,80	1,90	-	1,20	1,40	1,50	0,80	0,60
	2,60	1,80	-	1,20	1,40	1,50	0,80	0,60
	2,40	1,70	-	1,10	1,30	1,40	0,70	0,50
	2,20	1,60	-	1,00	1,30	1,20	0,50	0,40
	2,00	1,50	-	0,80	1,10	1,10	0,40	0,30
	1,20	0,90	-	0,50	0,60	0,70	0,40	0,50
	1,50	1,10	-	0,60	0,70	0,80	0,40	0,40
	2,10	1,50	-	0,80	0,90	1,00	1,70	1,80
	2,90	1,90	-	1,10	1,40	1,50	1,70	1,70
	3,45	2,20	-	1,40	1,80	1,70	1,00	1,00
	2,20	1,60	-	1,00	1,20	1,10	0,90	0,80
	3,40	2,20	-	1,60	1,80	1,80	1,00	1,30
3,00	1,90	-	1,10	1,50	1,50	0,80	0,90	

	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Lo</b>	44,60	43,10	37,80	33,60	29,10	23,60	15,80	13,30
<b>L</b>	47,50	46,00	40,40	36,10	30,00	23,90	18,30	15,30
	47,10	44,90	40,30	36,00	29,90	24,90	18,20	15,20
	47,10	44,90	40,30	35,80	29,90	23,90	18,20	15,00
	46,60	44,70	40,20	35,80	29,80	23,90	18,10	14,90
	46,40	44,60	40,20	35,70	29,80	24,00	18,20	14,50
	46,10	44,60	40,00	35,50	29,70	23,90	18,10	14,50
	45,50	44,00	39,80	35,40	29,50	23,90	18,10	14,00
	45,70	44,20	40,30	35,40	29,50	24,80	18,10	14,20
	46,50	44,60	40,80	35,70	29,80	24,00	18,30	15,00
	47,10	45,00	41,00	35,95	30,00	24,10	18,40	15,20
	47,60	45,30	41,10	36,10	30,00	24,15	18,50	15,40
	46,50	44,70	40,30	35,80	29,90	24,10	18,40	14,60
	47,60	45,30	40,50	36,40	30,10	24,40	18,70	15,50
	47,30	45,00	41,00	35,90	30,10	24,10	17,20	15,10
<b>L</b>	2,90	2,90	2,60	2,50	0,90	0,30	2,50	2,00
	2,50	1,80	2,50	2,40	0,80	1,30	2,40	1,90
	2,50	1,80	2,50	2,20	0,80	0,30	2,40	1,70
	2,00	1,60	2,40	2,20	0,70	0,30	2,30	1,60
	1,80	1,50	2,40	2,10	0,70	0,40	2,40	1,20
	1,50	1,50	2,20	1,90	0,60	0,30	2,30	1,20
	0,90	0,90	2,00	1,80	0,40	0,30	2,30	0,70
	1,10	1,10	2,50	1,80	0,40	1,20	2,30	0,90
	1,90	1,50	3,00	2,10	0,70	0,40	2,50	1,70
	2,50	1,90	3,20	2,35	0,90	0,50	2,60	1,90
	3,00	2,20	3,30	2,50	0,90	0,55	2,70	2,10
	1,90	1,60	2,50	2,20	0,80	0,50	2,60	1,30
	3,00	2,20	2,70	2,80	1,00	0,80	2,90	2,20
	2,70	1,90	3,20	2,30	1,00	0,50	1,40	1,80

**Tabla 20: Diferencia de presiones entre tomas en la misma sección**

Las presiones piezométricas, como se mencionó, se calcularon como la diferencia entre la lectura del ensayo y una lectura base, los resultados deberían ser similares a las láminas medidas, además se analizó la diferencia entre las tomas situadas a la misma altura para ver la confiabilidad de las mismas.

La Tabla 21 muestra las diferencias obtenidas, se ve que, para las primeras lecturas y la quinta, las presiones son muy similares, pero para el resto se encuentran diferencias muy amplias, ya que las mismas deberían ser multiplicadas por la escala (1:35) para proyectarlo en el prototipo. A las últimas lecturas se podría pensar que los errores se deben a que estas tomas están ubicadas en la parte baja del vertedero, entonces pequeños errores en la lectura tienen mayor influencia que en la parte superior, además, puede haber ciertas pérdidas en el trayecto por lo que las lecturas no son muy confiables, como sucedió con la toma 3 que no fue considerada.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,40	-0,80	-	-1,20	0,70	1,40	-1,50	-1,10
0,30	0,10	-	-1,20	0,60	0,20	-1,60	-1,30
0,10	0,00	-	-1,00	0,60	1,20	-1,60	-1,10
0,40	0,10	-	-1,10	0,60	1,10	-1,60	-1,10
0,40	0,10	-	-1,10	0,60	0,80	-1,90	-0,80
0,50	0,00	-	-1,10	0,50	0,80	-1,90	-0,90
0,30	0,00	-	-1,30	0,20	0,40	-1,90	-0,20
0,40	0,00	-	-1,20	0,30	-0,40	-1,90	-0,50

**Tabla 21: Presiones tomas sobre vertedero**

### 5.3.2. SENSORES DE PRESION

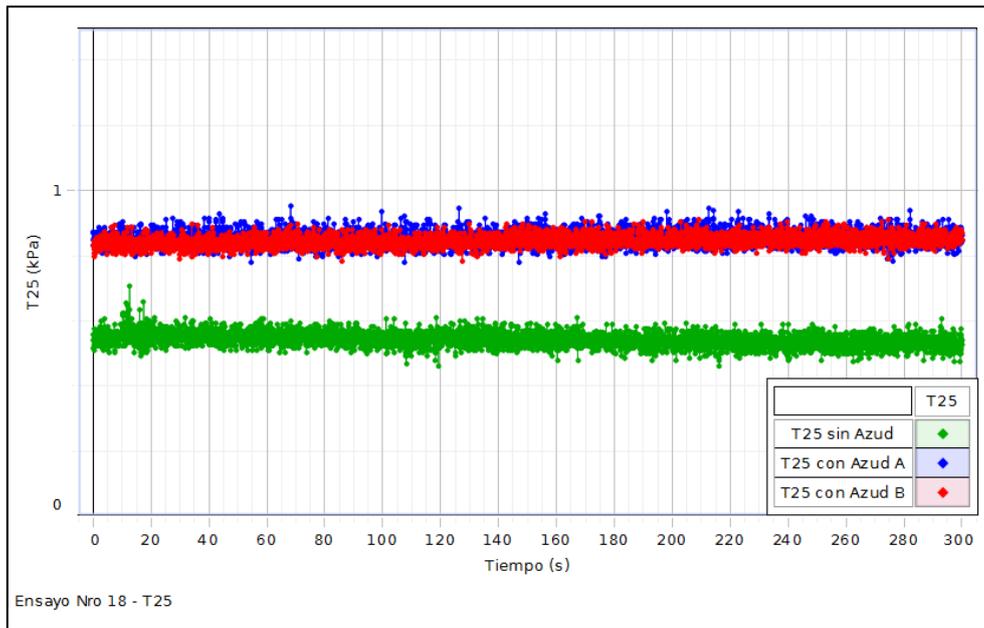
En la Figura 83 se muestran las distintas condiciones mencionadas (sin azud y con azud en posición A y B).

Cabe destacar que, aguas abajo del vertedero, se generan dos vórtices, uno vertical y otro horizontal, al colocar el azud se logra un control de los mismo (disminuyen), lo cual logra un ordenamiento del flujo.

Las presiones medidas con los sensores PASCO para el ensayo 18 en las tres condiciones consideradas, para la toma 25 que se consideró la más representativa en función de lo que se quería mostrar (Figura 84).



**Figura 82: Distintas condiciones (a) talud en posición A, (b) talud en posición B, (c) sin talud**



**Figura 83: Presiones medidas en la toma 25, Ensayo 18**

En la Tabla 22 se presentan los valores de la presión media, mínima y máxima registradas, el valor del desvío estándar y los intervalos de confianza superiores e inferiores (con un valor de significancia del 99%) para las tomas T20, T21, T23, T24 y T25.

Como se observa, en ninguna de las tomas se midieron presiones menores a cero, por lo que no se espera que existan presiones de succión en el lecho del río. Al colocar el azud se observaron dos cosas a destacar:

- i. Aumento de las presiones medias como consecuencia del remanso generado aguas arriba del azud, en la zona de disipación macroturbulenta.
- ii. Reducción de las amplitudes de las fluctuaciones de presión.

		Presión (Kpa)			Intervalo de confianza		Desvío Estanda
		media	max.	min.	Superior	Inferior	
Toma 20	Sin Azud	0,87	1,28	0,55	1,12	0,62	0,084
	Azud A	1,10	1,28	0,90	1,23	0,97	0,043
	Azud B	1,02	1,22	0,80	1,17	0,87	0,050
Toma 21	Sin Azud	1,05	1,19	0,85	1,17	0,92	0,042
	Azud A	1,13	1,27	0,99	1,22	1,04	0,030
	Azud B	1,12	1,28	0,95	1,22	1,02	0,034
Toma 23	Sin Azud	0,93	1,40	0,50	1,18	0,67	0,085
	Azud A	1,18	1,40	0,94	1,32	1,05	0,045
	Azud B	1,09	1,32	0,83	1,26	0,92	0,056
Toma 24	Sin Azud	0,73	0,84	0,54	0,79	0,67	0,021
	Azud A	0,95	1,02	0,85	1,01	0,88	0,021
	Azud B	0,99	1,08	0,82	1,05	0,94	0,019
Toma 25	Sin Azud	0,54	0,71	0,46	0,60	0,48	0,021
	Azud A	0,85	0,95	0,78	0,92	0,79	0,021
	Azud B	0,84	0,91	0,78	0,90	0,79	0,017

**Tabla 22: Presiones medidas en la T20, T21, T23, T24 y T25**

### 5.4. ANALISIS DIMENSIONAL Y EFECTOS DE ESCALA

Como se mencionó al principio del trabajo, existen distintos números adimensionales que deben ser evaluados para ver la confiabilidad en cuanto a la representación del modelo. Para este estudio, se consideró importante evaluar el número de Weber que evalúa la incidencia de la tensión superficial y el número de Reynold que lo que hace es decir en qué régimen se encuentra el flujo.

$$W_e = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de tensión superficial}} = \frac{\rho V_m^2 l}{\sigma}$$

$$R_e = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{\rho V_m l}{\mu}$$

En la Tabla 23, se observan los resultados obtenidos para el número de Weber, se considera como valido aquellos valores mayores a 10. Se ve que solo hay influencia de la tensión superficial para el caudal mínimo analizado y solo en la parte de salida del vertedero

	Qprototipo (m3/s)	Q	H (centro)	V (m/s)	Weber	VERIFICA
		<b>SUPERIOR</b>				
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,90	0,27	8,92	<b>8,92</b>
ENSAYO 8	25,8	3,56	2,00	0,27	20,38	<b>20,38</b>
ENSAYO 6	38,8	5,36	2,60	0,31	35,54	<b>35,54</b>
ENSAYO 13	46,6	6,43	2,90	0,34	45,85	<b>45,85</b>
ENSAYO 5	48,0	6,63	3,00	0,34	47,13	<b>47,13</b>
ENSAYO 9	50,3	6,94	3,00	0,35	51,64	<b>51,64</b>
ENSAYO 4	54,4	7,51	3,30	0,35	54,97	<b>54,97</b>
ENSAYO 3	59,4	8,20	3,60	0,35	60,07	<b>60,07</b>
ENSAYO 15	75,0	10,35	3,80	0,41	90,67	<b>90,67</b>
ENSAYO 2	75,2	10,38	3,90	0,41	88,85	<b>88,85</b>
ENSAYO 10	77,7	10,72	3,90	0,42	94,77	<b>94,77</b>
ENSAYO 16	82,6	11,40	4,10	0,42	101,95	<b>101,95</b>
ENSAYO 14	90,5	12,49	4,40	0,43	114,03	<b>114,03</b>
ENSAYO 1	93,2	12,86	4,50	0,43	118,20	<b>118,20</b>
ENSAYO 11	97,8	13,49	4,60	0,45	127,24	<b>127,24</b>

	Qprototipo (m3/s)	Q	H (centro)	V (m/s)	Weber	VERIFICA
		MEDIO				
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,20	1,20	40,15	40,15
ENSAYO 8	25,8	3,56	0,60	0,90	67,94	67,94
ENSAYO 6	38,8	5,36	0,60	1,36	154,00	154,00
ENSAYO 13	46,6	6,43	1,00	0,98	132,97	132,97
ENSAYO 5	48,0	6,63	0,80	1,26	176,72	176,72
ENSAYO 9	50,3	6,94	0,90	1,17	172,12	172,12
ENSAYO 4	54,4	7,51	1,10	1,04	164,91	164,91
ENSAYO 3	59,4	8,20	1,10	1,13	196,60	196,60
ENSAYO 15	75,0	10,35	1,20	1,31	287,11	287,11
ENSAYO 2	75,2	10,38	1,20	1,32	288,78	288,78
ENSAYO 10	77,7	10,72	1,10	1,48	336,00	336,00
ENSAYO 16	82,6	11,40	1,20	1,45	348,32	348,32
ENSAYO 14	90,5	12,49	1,10	1,73	456,12	456,12
ENSAYO 1	93,2	12,86	1,50	1,30	354,60	354,60
ENSAYO 11	97,8	13,49	1,50	1,37	390,19	390,19

	Qprototipo (m3/s)	Q	H (centro)	V (m/s)	Weber	VERIFICA
		INFERIOR				
ENSAYO 7	11,5	1,58	0,10	2,40	80,29	80,29
ENSAYO 8	25,8	3,56	0,30	1,81	135,87	135,87
ENSAYO 6	38,8	5,36	0,40	2,04	231,00	231,00
ENSAYO 13	46,6	6,43	0,50	1,96	265,95	265,95
ENSAYO 5	48,0	6,63	0,50	2,02	282,75	282,75
ENSAYO 9	50,3	6,94	0,50	2,11	309,81	309,81
ENSAYO 4	54,4	7,51	0,50	2,29	362,79	362,79
ENSAYO 3	59,4	8,20	0,60	2,08	360,43	360,43
ENSAYO 15	75,0	10,35	0,70	2,25	492,19	492,19
ENSAYO 2	75,2	10,38	0,80	1,97	433,16	433,16
ENSAYO 10	77,7	10,72	0,80	2,04	462,01	462,01
ENSAYO 16	82,6	11,40	0,70	2,48	597,12	597,12
ENSAYO 14	90,5	12,49	0,80	2,38	627,17	627,17
ENSAYO 1	93,2	12,86	0,90	2,17	591,00	591,00
ENSAYO 11	97,8	13,49	0,80	2,57	731,61	731,61

Tabla 23: Análisis número de Weber

En cuanto al número de Reynold, en la Tabla 24 se observan los valores obtenidos, claramente por la relación de variables, se obtiene él mismo número en todo el vertedero. Se constató que el modelo, para los distintos caudales, se encuentra en un flujo turbulento.

	Q	H (centro)	V (m/s)	Reynold	
		<b>SUPERIOR</b>			
ENSAYO 7	1,58	0,90	0,27	2400	TURBULENTO
ENSAYO 8	3,56	2,00	0,27	5407	TURBULENTO
ENSAYO 6	5,36	2,60	0,31	8140	TURBULENTO
ENSAYO 13	6,43	2,90	0,34	9765	TURBULENTO
ENSAYO 5	6,63	3,00	0,34	10069	TURBULENTO
ENSAYO 9	6,94	3,00	0,35	10540	TURBULENTO
ENSAYO 4	7,51	3,30	0,35	11405	TURBULENTO
ENSAYO 3	8,20	3,60	0,35	12453	TURBULENTO
ENSAYO 15	10,35	3,80	0,41	15719	TURBULENTO
ENSAYO 2	10,38	3,90	0,41	15764	TURBULENTO
ENSAYO 10	10,72	3,90	0,42	16280	TURBULENTO
ENSAYO 16	11,40	4,10	0,42	17313	TURBULENTO
ENSAYO 14	12,49	4,40	0,43	18969	TURBULENTO
ENSAYO 1	12,86	4,50	0,43	19531	TURBULENTO
ENSAYO 11	13,49	4,60	0,45	20487	TURBULENTO

	Q	H (centro)	V (m/s)	Reynold	
		<b>MEDIO</b>			
ENSAYO 7	1,58	0,20	1,20	2400	TURBULENTO
ENSAYO 8	3,56	0,60	0,90	5407	TURBULENTO
ENSAYO 6	5,36	0,60	1,36	8140	TURBULENTO
ENSAYO 13	6,43	1,00	0,98	9765	TURBULENTO
ENSAYO 5	6,63	0,80	1,26	10069	TURBULENTO
ENSAYO 9	6,94	0,90	1,17	10540	TURBULENTO
ENSAYO 4	7,51	1,10	1,04	11405	TURBULENTO
ENSAYO 3	8,20	1,10	1,13	12453	TURBULENTO
ENSAYO 15	10,35	1,20	1,31	15719	TURBULENTO
ENSAYO 2	10,38	1,20	1,32	15764	TURBULENTO
ENSAYO 10	10,72	1,10	1,48	16280	TURBULENTO
ENSAYO 16	11,40	1,20	1,45	17313	TURBULENTO
ENSAYO 14	12,49	1,10	1,73	18969	TURBULENTO
ENSAYO 1	12,86	1,50	1,30	19531	TURBULENTO
ENSAYO 11	13,49	1,50	1,37	20487	TURBULENTO

	Q	H (centro) V (m/s)		Reynold	
		INFERIOR			
ENSAYO 7	1,58	0,10	2,40	2400	TURBULENTO
ENSAYO 8	3,56	0,30	1,81	5407	TURBULENTO
ENSAYO 6	5,36	0,40	2,04	8140	TURBULENTO
ENSAYO 13	6,43	0,50	1,96	9765	TURBULENTO
ENSAYO 5	6,63	0,50	2,02	10069	TURBULENTO
ENSAYO 9	6,94	0,50	2,11	10540	TURBULENTO
ENSAYO 4	7,51	0,50	2,29	11405	TURBULENTO
ENSAYO 3	8,20	0,60	2,08	12453	TURBULENTO
ENSAYO 15	10,35	0,70	2,25	15719	TURBULENTO
ENSAYO 2	10,38	0,80	1,97	15764	TURBULENTO
ENSAYO 10	10,72	0,80	2,04	16280	TURBULENTO
ENSAYO 16	11,40	0,70	2,48	17313	TURBULENTO
ENSAYO 14	12,49	0,80	2,38	18969	TURBULENTO
ENSAYO 1	12,86	0,90	2,17	19531	TURBULENTO
ENSAYO 11	13,49	0,80	2,57	20487	TURBULENTO

Tabla 24: Análisis número de Reynold

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se caracterizó mediante estudios experimentales, la hidrodinámica del flujo en el modelo físico de la presa Los Alazanes.

Las velocidades aguas arriba del vertedero presentan una distribución uniforme en altura, esto se constató mediante la comparación de velocidades obtenidas a partir de ensayos de PIV, ADV y FlowTracker. Se observa, para todas las condiciones ensayadas, que el flujo ingresa a la estructura en dirección perpendicular al eje del vertedero y que la distribución de velocidades aguas arriba del mismo no es estrictamente uniforme: se observan mayores velocidades sobre la margen opuesta a la presa de arco.

Se evaluó el vertedero para diferentes condiciones de caudal y se consideró la alternativa de colocar un azud aguas abajo del vertedero para mitigar posibles erosiones. A partir de la medición de presiones dinámicas, se puede observar que en ninguna de las tomas se midieron presiones menores a cero, por lo cual no se espera que existan presiones de succión en el lecho del río. Al colocar el azud se observó, por un lado, un aumento de las presiones medias debido al incremento del nivel del agua por efecto del remanso en la zona de disipación macroturbulenta y, por otro lado, una reducción de las amplitudes de las fluctuaciones de presión.

También, es importante destacar el hecho de que hayan verificado los números de Weber, excepto para el caso mencionado (caudal mínimo ensayo) y el haber corroborado de que el modelo se encuentra en régimen turbulento. Por lo tanto, los efectos de escala debidos a viscosidad y tensión superficial no son importantes.

### 6.1. CONCLUSIONES PERSONALES

El haber hecho la practica supervisada constituyó un nuevo desafío, una experiencia laboral y una gran oportunidad, tanto para aplicar conocimientos aprendidos a lo largo de la carrera de Ingeniería Civil así como también el haber podido trabajar con un modelo físico.

En el Laboratorio de Hidráulica de la UNC se cuenta con una variada cantidad de equipos e instrumentos que sirvieron de apoyo para realizar las tareas necesarias, y además considero que esta experiencia ayudó a un crecimiento tanto académico y personal. También esto es gracias a los integrantes del laboratorio que estuvieron siempre predispuestos a ayudarme y explicarme.

## 7. BIBLIOGRAFIA

CAUCA. (2012). *Estudio y Patronamiento de Vertederos, Limusa S.A., Colombia.*

Farras, L. P. (2005). *Cátedra de hidráulica aplicada a la ingeniería. Obtenido de [http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos\\_orificios\\_vertederos.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_orificios_vertederos.pdf)*

Fuentes, R. (2002). *Modelos hidráulicos: teoría y diseño, Lilian Salinas Ayala, Chile.*

Lopardo, R. (2005). *Teoría y práctica de los modelos físicos, Curso sobre: Hidráulica Experimental Aplicada a Estructuras, Ciudad Real, España.*

Sotelo Avila, G. (1982). *Hidraulica General Volumen I., Limusa S.A., Mexico.*

Streeter, Victor L. (1988). *Mecánica de los Fluidos, McGRAW-HILL, Mexico.*

Tesis de Grado Carrera Ingeniería Civil (2012). *Caracterización del flujo en Modelo Físico del Vertedero Lateral del Aprovechamiento Múltiple Los Monos, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*

Universidad Politécnica de Valencia (2009). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica, España.*

Ven Te Chow (1994). *Hidrología Aplicada, McGRAW-HILL, Colombia.*

Vergara Sanchez M. A. (1995). *Técnicas de modelación en hidráulica, Alfaomega, México D. F..*